

UMA OPORTUNIDADE DE INDUSTRIALIZAÇÃO NEGLIGENCIADA?

Como o Sul Global Pode Tirar Proveito da
Remoção de Dióxido de Carbono (CDR)

Sebastian Manhart, *Senior Policy Advisor, Carbonfuture*
sebastian@carbonfuture.earth

Raphaël Cario, *Energy and CDR Policy Consultant*
raphaelhpcario@gmail.com

SOBRE O TIDE CENTRE

O Centro de Tecnologia e Industrialização para o Desenvolvimento (Technology and Industrialisation for Development Centre – TIDE) é um centro multidisciplinar de pesquisa vinculado ao Departamento de Desenvolvimento Internacional da Universidade de Oxford. Fundado em 2008, o TIDE reúne pesquisadores e profissionais que reconhecem a tecnologia e a industrialização como motores fundamentais do desenvolvimento sustentável. O Centro investiga as complexas relações entre comércio, investimento, tecnologia, inovação e prosperidade inclusiva.

O TIDE (anteriormente conhecido como TMCD) dá continuidade ao trabalho pioneiro desenvolvido desde a década de 1970 por renomados economistas do desenvolvimento de Oxford, como Frances Stewart, Sanjaya Lall, Barbara Harriss-White, Adrian Wood e Valpy FitzGerald. Em uma época em que a agenda do desenvolvimento era dominada por temas como segurança alimentar, redução da pobreza e cooperação internacional, esses estudiosos defenderam o papel transformador da tecnologia e da industrialização como pilares fundamentais para o progresso econômico e social.

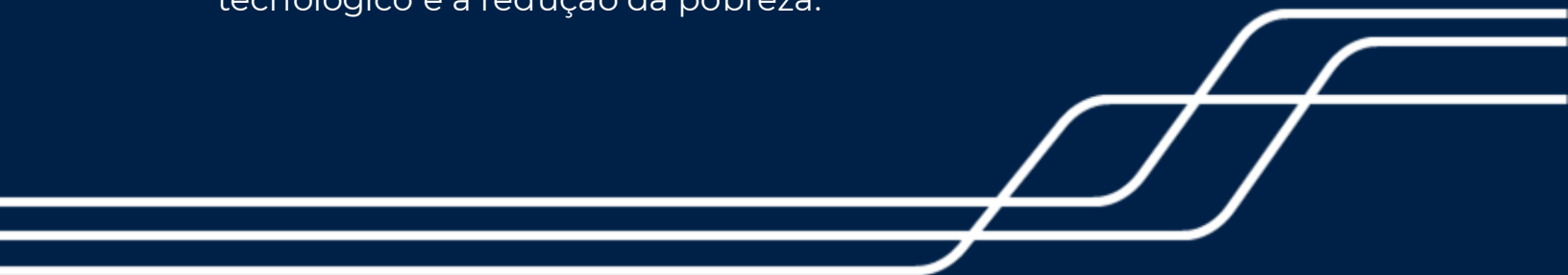
Hoje, a missão do Centro é mais relevante do que nunca. Diante do aumento das desigualdades nas capacidades tecnológicas e da retomada da corrida global pela industrialização, especialmente no contexto da transição para uma economia de baixo carbono, torna-se essencial expandir as fronteiras do conhecimento sobre inovação e política industrial para promover prosperidade local e uma sustentabilidade verdadeiramente inclusiva.

Saiba mais em: oxford-tide.org



RESUMO

A remoção de dióxido de carbono (CDR, na sigla em inglês) é um componente central para o alcance do net-zero e a única solução disponível para lidar tanto com as emissões residuais quanto com as históricas. Desde 2018, o setor expandiu-se rapidamente, superando 600 empresas, crescendo a uma taxa anual superior a 200% e ultrapassando US\$ 10 bilhões em valor de mercado acumulado. No entanto, a atividade permanece amplamente concentrada nas economias avançadas. Este artigo examina o potencial do Sul Global para participar e se beneficiar dessa indústria emergente. As regiões em desenvolvimento detêm aproximadamente 70–75% dos resíduos de biomassa globais, 65–70% da capacidade geológica de armazenamento de CO₂ e abundante energia renovável de baixo custo, oferecendo condições favoráveis para a expansão de abordagens duráveis de CDR, como a remoção de carbono por biocarvão, BECCS, DACCS e intemperismo acelerado de rochas. Com níveis plausíveis de implantação em 2050 de 1,5 a 5 GtCO₂ por ano, o setor poderia sustentar de 3 a 9,5 milhões de empregos e gerar entre US\$ 180 e US\$ 600 bilhões em valor agregado anual até 2050, comparável aos principais setores industriais do Norte Global. Estudos de caso da Bolívia, Brasil e Quênia destacam configurações iniciais em que a CDR combina remoções com emprego rural, aprendizagem tecnológica e melhorias na qualidade do solo e do ar. À medida que marcos regulatórios como o Regulamento de Certificação de Remoção de Carbono da UE e o Artigo 6 do Acordo de Paris amadurecem, o alinhamento de políticas domésticas, financiamento e governança pode permitir que as economias em desenvolvimento capturem uma fatia significativa do mercado. Posicionada como uma janela verde de oportunidade, a CDR oferece um caminho para a industrialização de baixo carbono que se afasta dos modelos de crescimento extrativista, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação duradoura, o upgrading tecnológico e a redução da pobreza.



AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar sua mais profunda gratidão a Amir Lebdioui, cuja orientação intelectual e feedback contínuo foram fundamentais ao longo da pesquisa e da redação deste artigo. Agradecem também a Baptiste Albertone, Tinhinan El Kadi e aos colegas do Oxford TIDE Centre pela revisão cuidadosa e pelas contribuições metodológicas.

Este trabalho se baseia diretamente em perspectivas generosamente compartilhadas por profissionais e formuladores de políticas do ecossistema de CDR do Sul Global. Os autores são especialmente gratos a Faith Temba (Gabinete do Enviado Especial do Quênia para as Mudanças Climáticas), Axel Reinaud (NetZero, Brasil), Francesco Guglielmi (Exomad Green, Bolívia) e Fiona Mugambi (Octavia Carbon, Quênia) pelo tempo, abertura e contribuição aos estudos de caso que fundamentam esta pesquisa.



ÍNDICE

1. Introdução
2. O que é a CDR Durável e Qual é o Seu Papel nas Estratégias de Net-Zero do Sul Global
3. O Argumento do Desenvolvimento: O que a CDR Pode Oferecer
4. Estudos de Caso por País: Lições Aprendidas de Bolívia, Brasil e Quênia
5. Riscos Renovados de Extrativismo
6. Implicação para Políticas Públicas
7. Conclusão: Uma Oportunidade de Industrialização Negligenciada



1. Introdução

Para alcançar o net-zero, é preciso antes de tudo reduzir as emissões. No entanto, sempre haverá emissões residuais que não podem ser eliminadas, além de emissões históricas que precisam ser removidas da atmosfera – caso contrário, continuarão a aquecer o planeta. Ao contrário do sequestro e armazenamento de carbono (CCS, na sigla em inglês), que impede novas emissões na fonte, a remoção de dióxido de carbono (CDR) extrai o CO₂ do ar e o armazena por períodos que vão de anos a milênios. A CDR é a única forma de lidar tanto com as emissões residuais quanto com as históricas.

A CDR evoluiu rapidamente de conceito científico para um setor industrial reconhecível: desde sua gênese científica em 2018 (IPCC 2018), o setor cresceu a uma taxa superior a 200% ao ano, tornando-se uma indústria nascente de múltiplos bilhões de euros, com 600 empresas distribuídas por mais de uma dúzia de vias tecnológicas ([CDR.fyi, 2025a](#)). Além do seu impacto climático, a CDR está associada a uma série de benefícios sociais, agrícolas e econômicos. Como resultado, muitos governos ao redor do mundo estão apoiando o crescimento de indústrias domésticas de CDR.

No entanto, ainda estamos nos primeiros estágios, e "janelas verdes de oportunidade" permanecem abertas para os países que aproveitarem esse momento. Elaborado às vésperas da COP30 em Belém (novembro de 2025), este artigo questiona se essa janela pode gerar resultados de desenvolvimento amplos no Sul Global ou se tende a reforçar as assimetrias econômicas em benefício do Norte Global¹.

Quando apoiada por uma política industrial coerente, governança equitativa e regras internacionais claras, concluímos que a CDR no Sul Global poderia gerar de 3 a 9,5 milhões de empregos e entre US\$ 180 e US\$ 600 bilhões em valor agregado anual até 2050, ao mesmo tempo em que fornece remoções efetivas em termos de custo para compradores do Norte Global – tanto corporações quanto governos.

O artigo se desenvolve em quatro etapas. Primeiro, define a CDR durável e explica por que a durabilidade – e não apenas a quantidade de toneladas – sustenta a integridade e o valor

¹ Neste artigo, o Norte Global engloba as economias industrializadas de rendimento elevado, em grande parte membros da OCDE, caracterizadas por mercados de capitais profundos, capacidade de definição de normas e uma procura crescente de remoções de elevada integridade. O Sul Global refere-se às economias de rendimento baixo e médio em África, na América Latina e Caribenha, e em grande parte da Ásia. Utilizamos estes termos como categorias analíticas, e não geográficas: operacionalmente, o "Norte" aproxima-se das economias avançadas do FMI e dos grupos de rendimento elevado do Banco Mundial, enquanto o "Sul" se alinha com as economias de mercado emergentes e em desenvolvimento do FMI e com os grupos de rendimento baixo e médio do Banco Mundial ([Dados & Connell, 2012](#); [FMI, 2023](#); [Banco Mundial, 2025a](#)). Mantemos esta nomenclatura simplificada porque capta assimetrias estruturais persistentes em matéria de finanças, tecnologia e elaboração de normas que são relevantes para a formação e governança do mercado de CDR. Ambas as designações são heterogêneas e dependentes do contexto; cada uma engloba capacidades, condicionantes e economias políticas diversas.

de mercado. Em segundo lugar, apresenta o argumento do desenvolvimento com efeitos quantificados sobre emprego e produção sob faixas plausíveis de implantação no Sul Global. Em terceiro lugar, fundamenta o argumento em estudos de caso de países – Bolívia, Brasil e Quênia – para ilustrar o impacto de diferentes estruturas de propriedade, capacidades e trajetórias políticas. Por fim, oferece implicações políticas tanto para o Norte quanto para o Sul: instrumentos industriais e arranjos de governança. O objetivo é prático: demonstrar como a CDR pode se tornar uma solução de dupla finalidade, gerando tanto resultados climáticos quanto oportunidades industriais, sem reproduzir os antigos padrões de dependência.

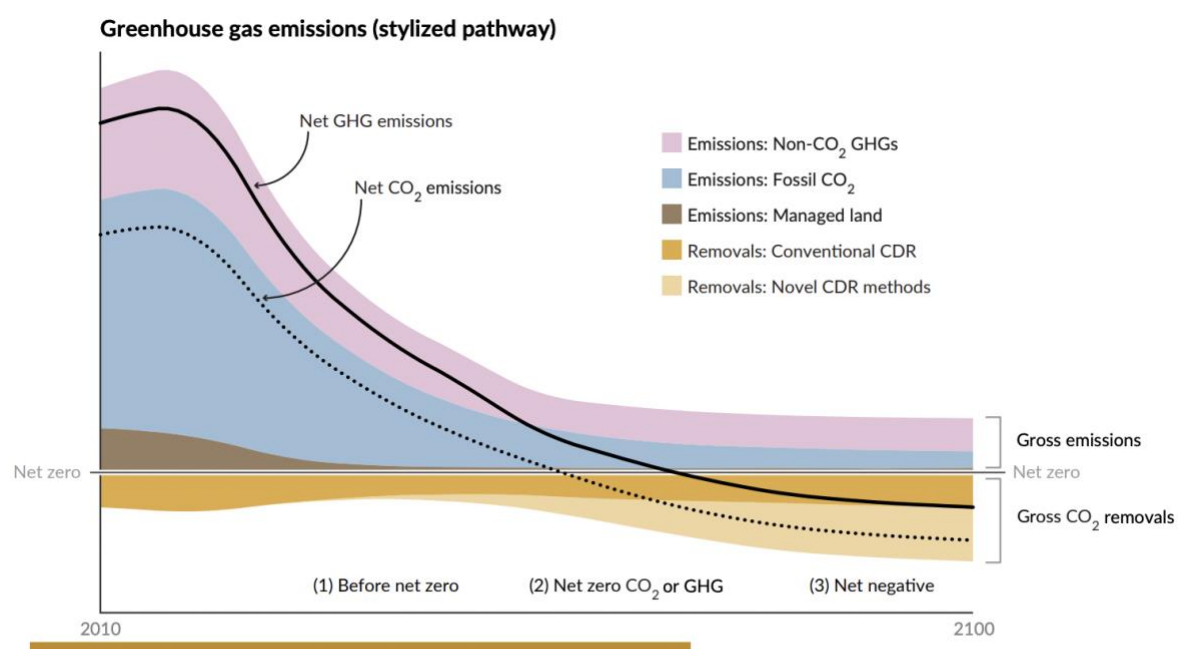


Figure 1.1 Roles of carbon dioxide removal (CDR) in ambitious mitigation strategies, applicable at national and global levels. Basic emission and removal components of mitigation pathways, and the corresponding trajectories for both net carbon dioxide (CO₂) and greenhouse gas (GHG) emissions. (Adapted from Babiker et al., 2022.)⁴

Figura 1: A CDR nos objetivos de net-zero (State of CDR, 2024)

2. O que é a CDR Durável e Qual é o Seu Papel nas Estratégias de Net-Zero do Sul Global

O que é a CDR e o que ela não é

A CDR refere-se à atividade humana que captura CO_2 da atmosfera e o armazena por períodos que vão de anos a milênios em reservatórios geológicos, terrestres, oceânicos ou industriais ([State of CDR, 2024](#)). Compreender o que é a CDR exige situá-la em contraste com as estratégias convencionais de mitigação, como o sequestro e armazenamento de carbono (CCS). O CCS captura as emissões no ponto de liberação – como os gases de combustão provenientes de usinas termelétricas – e impede que entrem na atmosfera ([IEA, 2024a](#)). A CDR, por sua vez, tem como alvo o carbono já disperso no ar, abordando tanto as emissões históricas quanto as residuais ([Oh, 2025](#)).

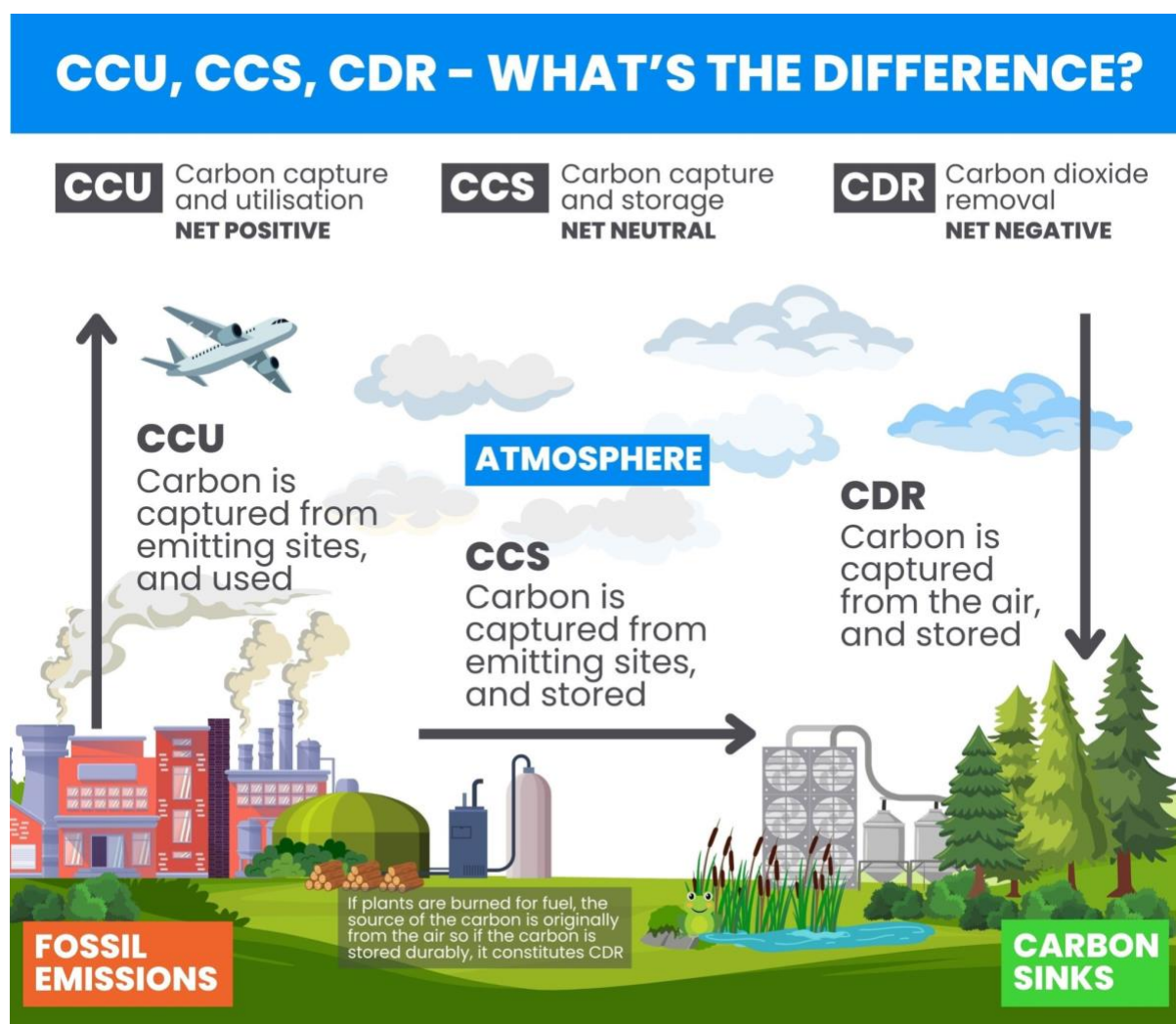


Figura 2: CCU/CCS/CDR ([Carbon Gap, 2025a](#))

Há sobreposições entre os dois domínios: os locais de armazenamento geológico utilizados no CCS também são centrais para alguns métodos duráveis de CDR, como a

captura direta do ar com armazenamento (DACCS) e a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) (Mintz-Woo & Lane, 2021). No entanto, essas sobreposições ocultam uma distinção essencial: o CCS é uma medida de redução de emissões, que diminui o volume bruto de emissões liberadas. A CDR, por outro lado, gera "emissões negativas" ao criar um fluxo líquido de CO₂ para fora da atmosfera, permitindo o equilíbrio nas estratégias de net-zero e, eventualmente, a negatividade líquida (IPCC, 2022). Os cenários de net-zero exigem ambos (IPCC, 2022), mas apenas a CDR pode neutralizar as emissões residuais e históricas.

Integridade do Mercado e o Legado dos Créditos de Baixa Qualidade

O debate público sobre os mercados de carbono é frequentemente moldado pelo legado das compensações de baixa integridade, que fomentou um ceticismo generalizado quanto à credibilidade dos sistemas de crédito de carbono. Investigações sobre projetos de desmatamento evitado (REDD+) e outros mecanismos de "evitação de emissões" documentaram uma superemissão sistemática de créditos e uma fraca adicionalidade. O jornal The Guardian (2023) constatou que mais de 90% dos créditos de compensação de florestas tropicais certificados pela Verra podem não representar reduções reais de emissões, ao passo que análises posteriores (The Guardian, 2024) sobre projetos florestais da Finite Carbon, empresa pertencente à BP, nos Estados Unidos, revelaram créditos emitidos para árvores que nunca estiveram em risco de corte. Meta-análises como a de Lezak et al. (2025) chegam a conclusões semelhantes, destacando falhas estruturais – linhas de base incertas, impermanência, vazamento e dupla contagem – em partes do mercado voluntário de carbono.

É fundamental destacar que essas controvérsias dizem respeito à evitação de emissões, e não à remoção de carbono. Os créditos de evitação buscam compensar emissões alegando que liberações futuras hipotéticas não ocorreram; eles não reduzem nem removem fisicamente o CO₂ da atmosfera. A CDR durável, por sua vez, remove o CO₂ já presente na atmosfera e o armazena – de forma mensurável – por séculos a milênios em formas geológicas, minerais ou de carbono estável. Sua verificação é empírica, não modelada: baseia-se em fluxos de carbono observados, vias de armazenamento rastreáveis e disposições de responsabilidade em caso de reversão. Essa distinção tornou-se central tanto na literatura acadêmica quanto nas políticas públicas. Um conjunto crescente de estudos argumenta que a crise de credibilidade que envolve os créditos tradicionais de compensação reforça a necessidade de direcionar o foco para remoções duráveis – atividades com armazenamento quantificável, permanência de longo prazo e contabilidade transparente (Schenuit et al., 2023; Romm, 2025). A recente onda de escândalos, portanto, não enfraqueceu a lógica da CDR, mas a clarificou: apenas remoções

mensuráveis e duráveis podem servir como instrumentos legítimos no âmbito das estruturas de net-zero e de conformidade.

Os marcos regulatórios agora refletem essa mudança. Os Princípios para Mercados Voluntários de Carbono Responsáveis do Tesouro dos EUA (2024), o Regulamento de Certificação de Remoção de Carbono da UE (CRCF) e a operacionalização do Artigo 6.4 do Acordo de Paris estabelecem critérios mais rigorosos de adicionalidade, linhas de base conservadoras, durabilidade do armazenamento e MRV (monitoramento, relato e verificação). Em conjunto, definem um novo setor de créditos de carbono de alta integridade, que emerge precisamente porque os modelos mais antigos de compensação se mostraram inadequados.

Visão Geral Tecnológica da CDR

A CDR abrange uma ampla gama de abordagens – biológicas, químicas e geológicas – que removem e armazenam o CO₂ atmosférico em escalas de tempo que vão de anos a milênios. Entre elas estão abordagens como o reflorestamento, o enriquecimento do carbono no solo e a restauração de zonas úmidas; vias de mineralização como o armazenamento mineral de carbono; e opções emergentes baseadas nos oceanos, como a alcalinização e a deposição de biomassa em águas profundas ([Whitebeard, 2025](#)).

As abordagens com perspectivas industriais de curto prazo mais claras e com evidências suficientes de durabilidade são a remoção de carbono por biocarvão (BCR, na sigla em inglês), o BECCS, o DACCS e o intemperismo acelerado de rochas (ERW). Essas quatro abordagens serão também o foco deste artigo.

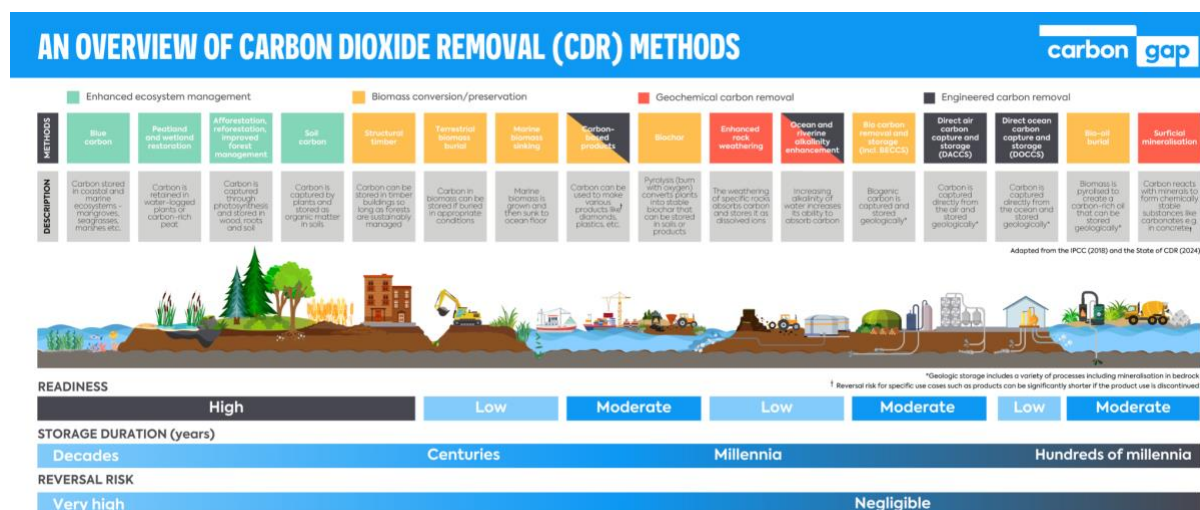


Figura 3: Tecnologias de CDR (Carbon Gap, 2025a)

A BCR converte resíduos agrícolas ou florestais em um sólido estável e rico em carbono por meio da pirólise, que pode ser aplicado ao solo ou integrado a materiais (NTR 8-9). O BECCS captura o CO₂ liberado pela energia de biomassa e o armazena no subsolo, produzindo tanto energia de baixo carbono quanto remoções duráveis (NTR 7-9). O DACCS extrai quimicamente o CO₂ diretamente do ar ambiente para armazenamento geológico, oferecendo elevada capacidade de verificação aliada a uma alta demanda energética (NTR 6-8). O ERW acelera a reação natural dos minerais solicitados com o CO₂, geralmente aplicado em terras agrícolas, formando carbonatos estáveis ao mesmo tempo em que melhora a fertilidade do solo (NTR 4-6) (Whitebeard, 2025; [Chiaramonti, 2024](#); [Ganeshan, 2023](#); [Bisotti, 2024](#); [Beerling et al., 2018](#); IPCC, 2022).

Essas quatro vias combinam durabilidade verificável do carbono com processos industriais escaláveis, tornando-se o foco deste artigo. Ainda assim, o panorama mais amplo da CDR permanece diverso, conforme ilustrado na Figura 3, abrangendo desde métodos biológicos e de engenharia, cuja maturidade e durabilidade variam amplamente.

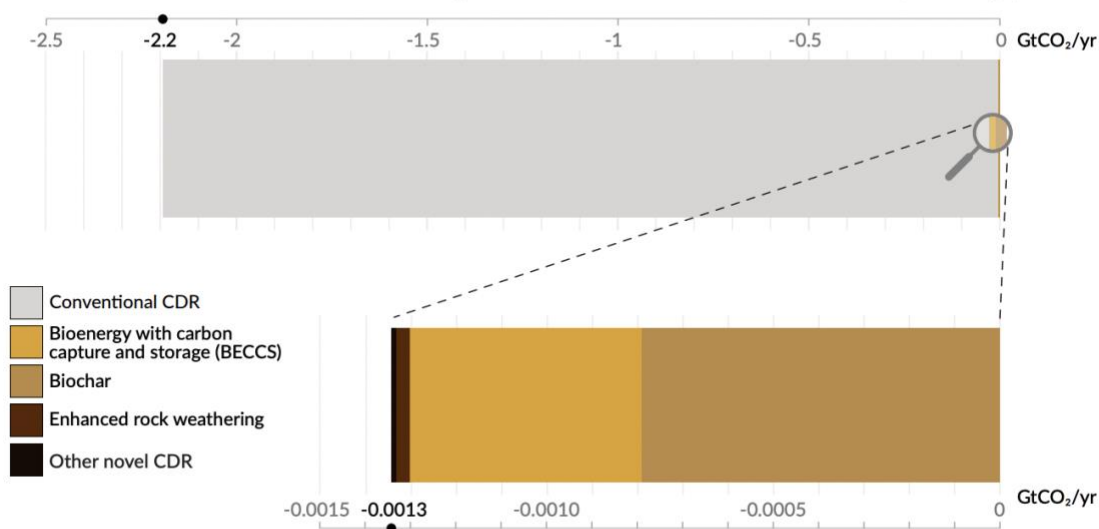
Por que a Durabilidade é Importante

Uma vez estabelecida a distinção entre remoção e redução, a questão da durabilidade torna-se central. Assim como a origem do CO₂ importa, também importa a escala temporal do seu sequestro. Nem todas as CDRs são iguais. A principal linha divisória é entre a CDR durável (frequentemente chamada de permanente) e a CDR temporária.

A CDR temporária – como o reflorestamento, o enriquecimento do carbono no solo e certas formas de restauração de ecossistemas – armazena carbono por anos ou décadas. Essas abordagens proporcionam cobenefícios essenciais para a biodiversidade, a adaptação e os meios de subsistência, mas o seu estoque de carbono permanece vulnerável a incêndios, pragas ou mudanças no uso do solo. Esse sequestro de curta duração pode ganhar tempo, mas não pode oferecer uma solução estrutural para a estabilização do clima ([Schenuit et al., 2023](#)). Trata-se de uma ferramenta complementar, e as remoções temporárias podem validamente compensar gases de efeito estufa de vida curta (SLGHGs, na sigla em inglês), como o metano e o óxido nitroso, cujos tempos de permanência na atmosfera são medidos em anos a décadas, e não em milênios. Mais importante ainda, o potencial de escala da CDR temporária é limitado. As remoções terrestres atuais já atingem cerca de 2 GtCO₂ por ano, e a maioria das análises sugere que a expansão sustentável será pequena, uma vez que a competição pelo uso da terra, o estresse hídrico e os trade-offs ecológicos restringem o crescimento ([Wang et al., 2025](#)).

Only a tiny fraction of all carbon dioxide removal results from novel methods

Total amount of carbon dioxide removal, split into conventional and novel methods (GtCO₂/yr)



Amount of carbon dioxide removal (CDR) is the sum of conventional CDR (2013-2022) and novel CDR (2023)

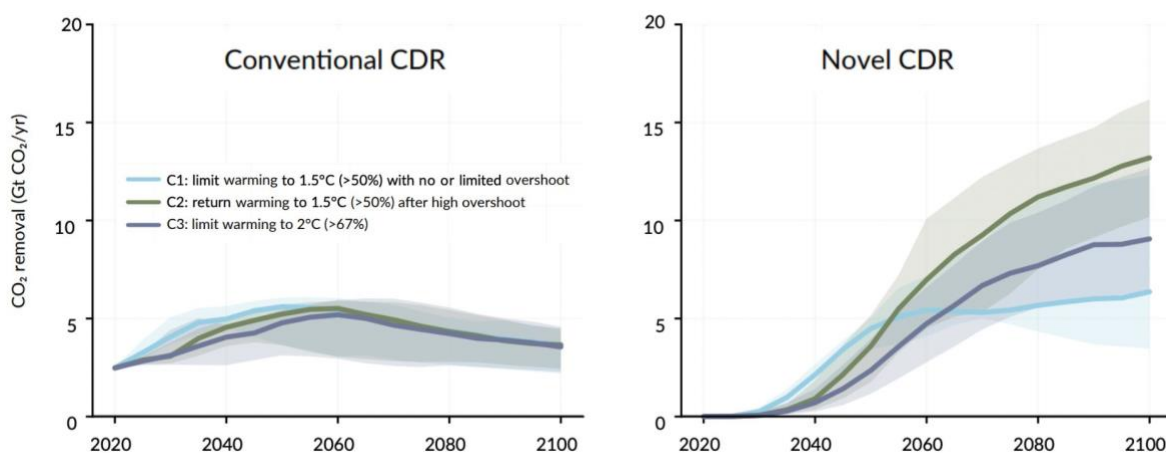


Figura 4: CDR Convencional vs. CDR Inovadora (State of CDR, 2024)

Em contraste, a CDR durável tem como objetivo o armazenamento ao longo de séculos a milênios, dependendo do reservatório. Rotas como o DACCS, o BECCS e o ERW oferecem os níveis mais altos de permanência, com o carbono armazenado por milênios. A BCR industrial também pode ser durável por séculos a milênios quando aplicada em matrizes finais estáveis. O aumento da alcalinidade oceânica pode atingir escalas de tempo semelhantes, embora a sua durabilidade ainda esteja sob avaliação (State of CDR, 2024; Lehmann et al., 2021; Sanei et al., 2024; Azzi et al., 2024). Aqui reside o teste de credibilidade da CDR: se as remoções forem revertidas em poucas décadas, não podem ser tratadas como equivalentes às emissões fósseis que persistem por milhares de anos

(Streck et al., 2025). É por isso que o chamado princípio da "equivalência direta" – remoções duráveis para emissões fósseis de longo prazo – é cada vez mais enfatizado nas políticas climáticas e nos mercados (Schenuit et al., 2023). A CDR durável representa hoje apenas alguns milhões de toneladas de remoções verificadas anualmente, mas o seu potencial escalável atinge 2 a 5 GtCO₂ por ano em meados do século na maioria dos cenários de net-zero (State of CDR, 2024).

Panorama Global do Mercado

A CDR durável está emergindo como um segmento de mercado distinto, tendo ultrapassado a marca de US\$ 10 bilhões em 2025 (CDR.fyi, 2025b). As transações e os padrões também estão tomando forma, mas os volumes atuais permanecem muito aquém da escala de múltiplas gigatoneladas exigida. Como referência: entre 4,5 e 9 GtCO₂ por ano de remoções serão necessárias até 2050 para permanecer dentro dos cenários de 1,5 a 2 °C (IPCC, 2022).

Total Sales

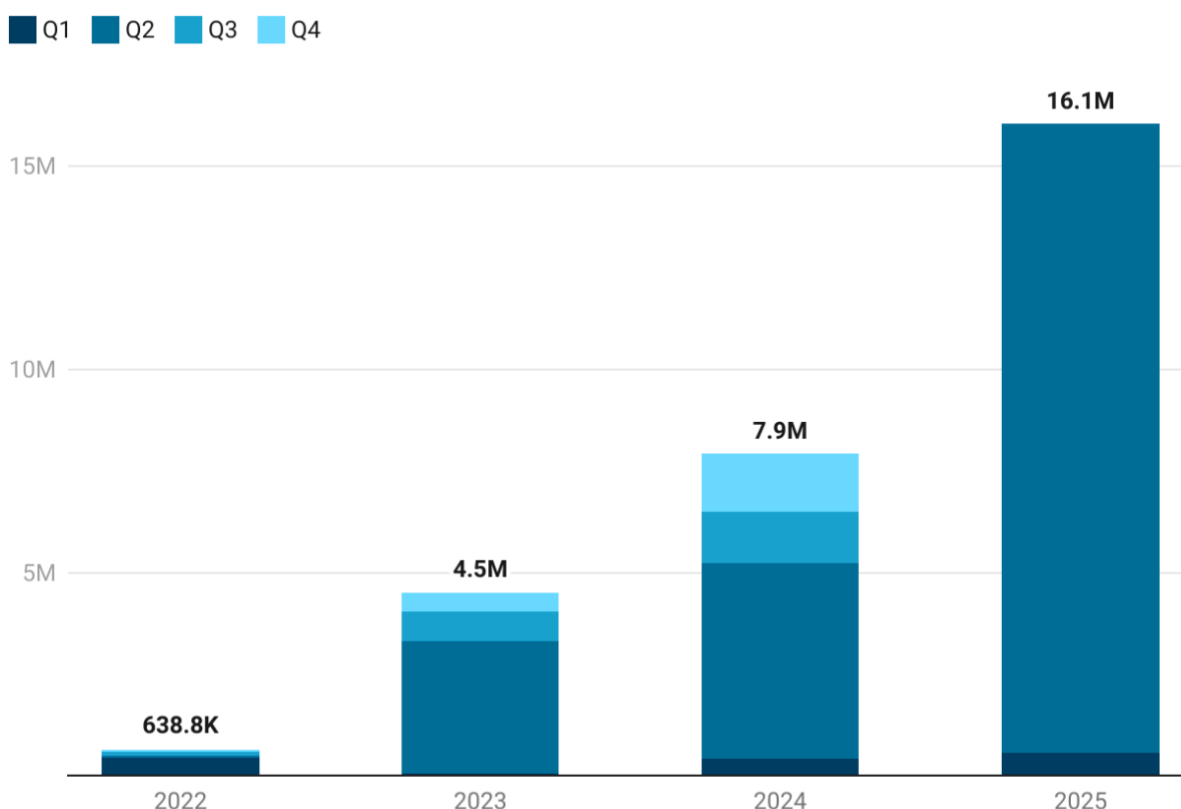


Figura 5: Vendas de CDR (CDR.fyi, 2025b)

O mercado de CDR abrange três arenas emergentes: mecanismos voluntários, de conformidade e supervisionados pela ONU. Atualmente, a CDR desempenha um papel pouco significativo nos mercados de conformidade, embora a sua integração esteja prevista em sistemas como o EU ETS e o UK ETS do Reino Unido após 2030. No âmbito do Artigo 6 do Acordo de Paris, os mecanismos supervisionados pela ONU estão tecnicamente operacionais para permitir o futuro comércio internacional voltado ao cumprimento das NDCs. No entanto, o CDR só integrou um único acordo do Artigo 6.2 e nenhuma metodologia de CDR durável foi adotada para o Artigo 6.4. Um acordo bilateral histórico entre a Suíça e a Noruega marcou a primeira transferência transfronteiriça de créditos de remoção durável sob o Artigo 6.2 e estabeleceu um marco para o

armazenamento permanente de CO₂ e para as transferências de ITMOs (S&P, 2025a). Consequentemente, a atividade de CDR hoje ocorre quase inteiramente no mercado voluntário de carbono (MVC), um espaço historicamente dominado por créditos de evitação e redução de emissões, como os de energias renováveis e florestais. Esses segmentos tradicionais estão agora se contraindo devido a preocupações com a credibilidade (SOVCM, 2025), com as regras e a procura corporativa se deslocando para remoções mensuráveis e duráveis. O mercado de CDR apenas emergiu por volta de 2020-2021, mas desde então tornou-se o segmento de crescimento mais rápido do MVC, expandindo-se de aproximadamente 1 MtCO₂ de remoções contratadas em 2022 para quase 40 MtCO₂ em meados de 2025 – um aumento de mais de 3.700% em três anos (CDR.fyi, 2025b) –, impulsionado pelos compromissos corporativos de net-zero e pela ascensão de quadros de certificação de alta integridade.

Durable CDR Purchase Volume | 2022 - 2025



Source: CDR.fyi • Created with Datawrapper

Figura 6: Volumes de CDR (CDR.fyi, 2025c)

As projeções de mercado destacam a dimensão desta oportunidade. Só até 2030, as estimativas situam o mercado entre US\$ 40 e US\$ 80 bilhões, com algumas projeções atingindo até US\$ 100 bilhões (BCG, 2024a; McKinsey & Company, 2023; Oliver Wyman,

2024). Em 2024, o mercado de CDR cresceu 78%, com volumes totais contratados atingindo quase 8 milhões de toneladas. Ao mesmo tempo, 2025 já registou um aumento significativo: apenas no segundo trimestre, foram contratadas 15 milhões de toneladas de CDR durável, mais do que em todos os trimestres anteriores combinados (CDR.fyi, 2025b). Os compradores no MVC adquiriram recentemente vários milhões de toneladas de CDR, agora avaliadas em bilhões de dólares (US\$ 10 bilhões em outubro de 2025, CDR.fyi, 2025b). As previsões apontam para um mercado global de CDR no valor de US\$ 517 a US\$ 1.029 bilhões² anuais até 2050, equivalente em dimensão à atual indústria de computação em nuvem (BCG, 2024a).

Estes números apontam para um mercado dinâmico com sinais de redução dos custos tecnológicos (Abegg et al., 2024), procura crescente e forte diferenciação regional. Só a Europa poderá necessitar de 500 (Comissão Europeia, 2024a; ESABCC, 2025) a 750 MtCO₂ por ano (BCG, 2024b) de remoções até 2050, enquanto países individuais estão definindo metas na ordem das dezenas de milhões de toneladas. Para as economias em desenvolvimento com abundância de biomassa, minerais ou energia renovável, a CDR representa não apenas uma necessidade de neutralidade climática, mas também um setor industrial potencialmente multibilionário em construção.

Sinais de Política

O Norte Global já está construindo a arquitetura industrial e regulatória para expandir a CDR. Na Europa, o Regulamento de Certificação de Remoção de Carbono estabelece a primeira certificação da UE para remoções duráveis, com probabilidade de se tornar o padrão de referência global para a certificação de CDR (Comissão Europeia, 2025a). A UE está cada vez mais a financiar P&D e projetos-piloto de CDR, ao mesmo tempo que explora a contratação pública de créditos de CDR (Carbon Gap, 2025b; Comissão Europeia, 2025b). Estas medidas estimulam simultaneamente a procura e preparam o terreno para a futura integração em sistemas de conformidade como o EU-ETS (Comissão Europeia, 2025c).

Paralelamente, os governos dos Estados-Membros está investindo diretamente nas suas próprias indústrias. A Alemanha planeja gastar mais de US\$ 550 milhões em projetos de CDR, incorporando-os ao seu marco climático para 2040 e criando um departamento dedicado a CDR (BMUKN, 2025). A Dinamarca comprometeu US\$ 1,43 bilhões de financiamento para BCR e mais de US\$ 370 milhões para iniciativas de CDR baseadas em CCS, atribuindo contratos plurianuais que reduzem o risco dos projetos iniciais e criam um pipeline de investimento atrativo (KEFM, 2022; ENS DK, 2025). Nos Estados Unidos, o

² €1 = \$1.10

crédito fiscal reforçado 45Q oferece até US\$ 180 por tonelada para DACCS com armazenamento geológico (IEA, 2024b) – uma política que já sustentou compromissos de bilhões de dólares por parte de empresas norte-americanas –, enquanto vários estados, como a Califórnia e Nova Iorque, acrescentam incentivos adicionais (GOV.CA, 2022; WRI, 2024). A Suécia tornou o BECCS central na sua estratégia de net-zero para 2045, com a Agência Sueca de Energia realizando leilões reversos no âmbito dos programas Klimatklivet e Industriklivet, no valor de até US\$ 3,63 bilhões, para adquirir remoções verificadas entre 2026 e 2040 (Comissão Europeia, 2024b). O Reino Unido está avançado com uma conceção de mercado semelhante através dos seus Modelos de Negócio GGR e da Revisão do UK ETS do Reino Unido, preparando-se para integrar remoções duráveis – inicialmente BECCS e DACCS – nos mercados de conformidade após 2030, ao mesmo tempo que investe bilhões através de contratos por diferença de carbono e projetos-piloto de clusters industriais (GOV.UK, 2025). O Canadá, por sua vez, combina um crédito fiscal federal de 60% para investimento em CCUS, alocando US\$ 2,3 bilhões ao longo de cinco anos e potencialmente até US\$ 5,5 bilhões até 2030 (CRA, 2024).

O padrão é evidente: o Norte Global não está apenas criando os padrões e os mecanismos de conformidade que irão reger os mercados futuros, mas também está financiando sua própria base industrial, apoiando empresas domésticas para capturar participação de mercado antecipada. Ao mesmo tempo, essa abordagem dupla – estimular a demanda por meio de certificação e regulação, enquanto reduz o risco da oferta por meio de subsídios e leilões – espelha as trajetórias que permitiram a expansão das renováveis. Ela posiciona as economias avançadas como pioneiras em um setor que pode alcançar centenas de bilhões de dólares anuais até meados do século.

Adotando a Perspectiva Industrial

A trajetória no Norte Global demonstra que a CDR funciona não apenas como um instrumento de mitigação, mas também como uma alavanca de política industrial verde. Esforços comparáveis no Sul Global permanecem limitados. A investigação sobre o *green catch-up* sublinha que os setores ambientais diferem dos paradigmas tecnológicos anteriores: são orientados por missão, intensivos em políticas públicas e globalmente difundidos (Lema, Fu e Rabellotti, 2020).

Ao contrário das dinâmicas de procura espontânea que caracterizaram expansões industriais anteriores, a economia verde de hoje é deliberadamente construída através de mercados institucionalmente concebidos, padrões de desempenho, subsídios, sistemas de certificação e contratação pública. Estes mecanismos não se limitam a corrigir falhas de mercado; constroem novos mercados para o valor ambiental onde anteriormente não existia nenhum. A CDR durável, baseada em regras de responsabilidade, metodologias de

certificação e regimes de apoio público, enquadra-se perfeitamente nesta economia arquitetada. Ela está emergindo não como um subproduto de incentivos privados, mas como um setor construído por políticas de transformação estrutural, redefinindo como o crescimento industrial e a mitigação climática se articulam.

Precedentes históricos do Sul Global ilustram como a construção industrial deliberada permitiu que economias retardatárias capturassem valor em setores emergentes. O programa de etanol do Brasil nas décadas de 1970 e 1980 transformou um excedente de açúcar numa indústria global de biocombustíveis através de mandatos estatais e da inovação em veículos *flex-fuel* (Goldemberg, 2006). O Quênia aproveitou o seu recurso geotérmico para construir uma base elétrica competitiva através de financiamento concessionário e coordenação de serviços públicos (Carnegie Endowment, 2025). A energia solar fotovoltaica, outrora uma tecnologia de nicho, expandiu-se globalmente em duas décadas através das tarifas de injeção europeias, da política industrial chinesa e de efeitos cumulativos de aprendizagem (Wen et al., 2021). Em todos os casos, os Estados geraram procura e possibilitaram a aprendizagem tecnológica – condições agora necessárias para que a CDR evolua de projetos-piloto para uma indústria consolidada.

As janelas verdes de oportunidade (GWOs, na sigla em inglês) são ‘circunstâncias temporárias, porém favoráveis, para o catch-up de longo prazo de países retardatários’, abertas por mudanças em tecnologias, mercados e instituições; se os países se beneficiam delas depende de respostas políticas firmes. A tecnologia cria a janela; a intervenção estatal coordenada e a construção de capacidades determinam se ela será aproveitada (Lema, Fu e Rabellotti, 2020). A criação de demanda e a construção de capacidades precisam ser sincronizadas para que os retardatários capturem os benefícios das transições verdes. Caso contrário, os países caem em *market traps* (capturar volumes de demanda sem aprimorar capacidades tecnológicas) ou *capability traps* (construir conhecimento sem mercados viáveis).

A energia renovável ilustra esse processo: as tarifas de injeção europeias inicialmente criaram tanto demanda quanto capacidade industrial doméstica, especialmente na fabricação de equipamentos eólicos e solares. No entanto, quando a competição global se intensificou, os marcos de apoio da Europa se fragmentaram, enquanto a política industrial da China se mostrou muito mais contínua e coordenada, permitindo-lhe capturar a liderança produtiva (Bian et al., 2024; Wen et al., 2021). O CDR apresenta hoje uma assimetria semelhante: a demanda está sendo construída principalmente no Norte Global por meio do mercado voluntário de carbono, de compras públicas e de esquemas de subsídios, mas a capacidade do Sul Global de desenvolver capacidades tecnológicas e regulatórias correspondentes determinará se conseguirá capturar o valor emergente ou se

permanecerá confinada aos estratos extrativos da economia de remoção de carbono – fornecendo biomassa, terra e armazenamento enquanto outros controlam tecnologia, certificação e financiamento.

Uma segunda perspectiva enfatiza a adequação tecnológica. ‘Tecnologia apropriada’ é aquela que se alinha aos contextos locais de recursos e instituições (Fu e Shi, 2022). A industrialização tardia é mais eficaz quando novas tecnologias se ajustam às dotações de recursos, aos mercados de trabalho e às capacidades institucionais locais. Isso se aplica diretamente ao CDR: o BCR é adequado a economias ricas em biomassa e intensivas em mão de obra (USDA, 2021); o BECCS se alinha a regiões que combinam biomassa e capacidade de armazenamento (Freer et al., 2022); o ERW depende de dotações minerais e de logística (Oppon et al., 2024); e o DACCS prospera onde renováveis e armazenamento estão co-localizados (Boerst et al., 2024). Essa diversidade permite processos de industrialização diferenciados, em vez de um modelo uniforme. Os países podem identificar e escalar a opção mais adequada ao seu próprio contexto.

Por fim, análises estruturais da globalização destacam a urgência do tema. A digitalização e a automação estão fechando o caminho tradicional de industrialização baseado em exportações (Fu, 2024). Os setores verdes, em contraste, continuam intensivos em trabalho e recursos, dependentes de políticas públicas e globalmente comercializáveis, constituindo assim um dos poucos caminhos viáveis (Lema, Fu e Rabellotti, 2020). O CDR durável exemplifica essa oportunidade: ele é sustentado por uma demanda orientada por políticas e por políticas industriais emergentes no Norte Global, mas sua escalabilidade de longo prazo depende do acesso a recursos e da capacidade produtiva concentrada no Sul Global. Se as economias do Sul conseguirem converter essas dotações em capacidade tecnológica e industrial antes que os incumbentes do Norte consolidem o campo determinará a geografia da criação de valor nesse novo setor.

Em conjunto, os arcabouços das GWOs, da adequação tecnológica e da reestruturação global mostram que o argumento de desenvolvimento para o CDR é ao mesmo tempo plausível e crítico em termos de tempo. O Norte Global já está construindo o mercado; o desafio do Sul é assegurar uma parcela dos ganhos industriais e econômicos enquanto a janela permanece aberta.

3. O Argumento do Desenvolvimento: O que a CDR Pode Oferecer

Potenciais Benefícios para o Norte Global

O potencial econômico do CDR já está sendo detalhadamente mapeado para as economias avançadas. Para a União Europeia, o Boston Consulting Group (BCG, 2024b) e a Associação Alemã para Emissões Negativas (DVNE) estimam que portfólios compatíveis com a limitação do aquecimento a 1,5-2 °C poderiam exigir entre 0,9 e 1,9 GtCO₂ de remoções até 2050. Tal implantação sustentaria entre 335.000 e 670.000 empregos – diretos, indiretos e induzidos – mesmo em mercados de trabalho de alta produtividade. O volume de negócios associado ao setor é projetado em US\$ 121 a US\$ 248 bilhões anuais, o que equivale a aproximadamente US\$ 130 por tonelada de CO₂ removida (BCG/DVNE, 2024b).

Estudos em nível nacional reforçam esse panorama. Na França, BCG e AFEN projetam que, até 2050, o país poderia remover entre 185 e 365 MtCO₂, sustentando de 65.000 a 130.000 empregos e gerando entre US\$ 27,5 e US\$ 55 bilhões em receitas anuais (BCG/AFEN, 2025). Na Alemanha, BCG e DVNE estimam que uma capacidade de remoção entre 74 e 131 MtCO₂ poderia apoiar de 66.000 a 155.000 empregos e gerar entre US\$ 14 e US\$ 33 bilhões em valor econômico anual (BCG/DVNE, 2024b). De forma semelhante, nos Estados Unidos, o Rhodium Group conclui que alcançar 100 MtCO₂ de remoções duráveis poderia sustentar entre 95.000 e 130.000 empregos, aproximadamente dois terços deles em funções operacionais permanentes (Rhodium Group, 2025a). Esses números são indicativos: o emprego e o valor agregado dependerão da maturidade tecnológica, da escala e dos modelos de implantação. Supondo trajetórias de aprendizado semelhantes às de outros setores verdes, ganhos de produtividade reduzirão gradualmente a intensidade de mão de obra. Para contextualizar, o setor europeu de bens e serviços ambientais gerou cerca de €538 bilhões em VAB (EEA, 2025) e aproximadamente 6,7 milhões de equivalentes a tempo integral em 2022 (Comissão Europeia, 2025d) – cerca de 12.450 empregos por € bilhão – enquanto as projeções de BCG/DVNE implicam entre ~1.350 e 5.540 empregos por US\$ bilhão. Essa menor intensidade de emprego é consistente com os maiores requisitos de capital da CDR, mas ainda indica um setor de relevância macroeconômica substancial quando escalado aos volumes de mercado projetados.

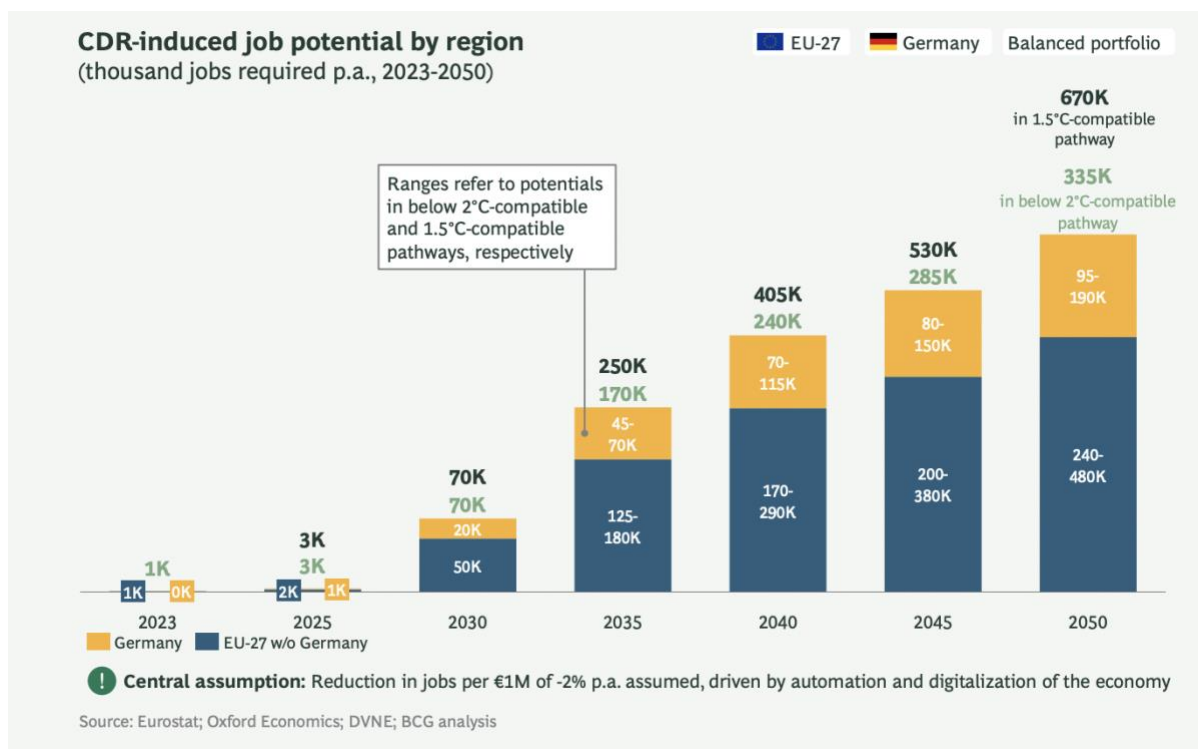


Figura 7: Empregos de CDR na UE 2023-2050 (BCG/DVNE, 2024b)

Em outras palavras, para o Norte Global, o argumento de que o CDR é uma fonte de empregos e de valor econômico já começa a ser quantificado, modelado, apoiado por formuladores de políticas e incorporado em estratégias industriais orientadas para o futuro. As economias avançadas estão se posicionando para capturar os benefícios de um mercado que deverá alcançar centenas de bilhões de dólares anuais até meados do século.

Mas isso levanta uma questão crítica: por que esses benefícios deveriam ficar confinados ao Norte Global? As mesmas oportunidades estruturais – novos setores industriais, emprego rural, atividades de maior valor agregado – são igualmente relevantes, e em muitos casos ainda mais pronunciadas, no Sul Global. De fato, as dotações de recursos e as intensidades de trabalho sugerem que as economias em desenvolvimento estão especialmente bem posicionadas para entregar remoções em larga escala.

A Vantagem Comparativa do Sul Global

A CDR poderia se tornar uma indústria de exportação de múltiplos bilhões de dólares no Sul Global, um vetor de crescimento capaz de gerar milhões de empregos. Em toda a América Latina, África e Ásia, os recursos se alinham diretamente aos requisitos físicos do CDR durável.

O Sul Global concentra a maior parte dos resíduos agrícolas de biomassa do mundo, um insumo necessário para várias tecnologias de CDR, como BCR ou BECCS, devido à sua predominância em culturas e indústrias de processamento intensivas em resíduos. O total de resíduos excede 5,2 gigatoneladas por ano, das quais cerca de 3,7–4,0 gigatoneladas ($\approx 70\text{--}75\%$) são geradas em regiões em desenvolvimento ([Sileshi et al., 2025](#)). Esses volumes provavelmente aumentarão à medida que a produção agrícola global se expanda entre 30% e 50% até 2050, implicando um aumento comparável na geração de resíduos ([FAO, 2012](#); [van Dijk et al., 2021](#)) – 5–6 Gt de biomassa representam 2–6 Gt de CDR ([Shahbaz M. et al., 2021](#); [Woelf D. et al., 2021](#)). As florestas tropicais e subtropicais respondem por mais de 55% dos estoques globais de carbono em biomassa florestal, oferecendo um potencial substancial para resíduos lenhosos obtidos de forma sustentável ([Mills et al., 2023](#)).

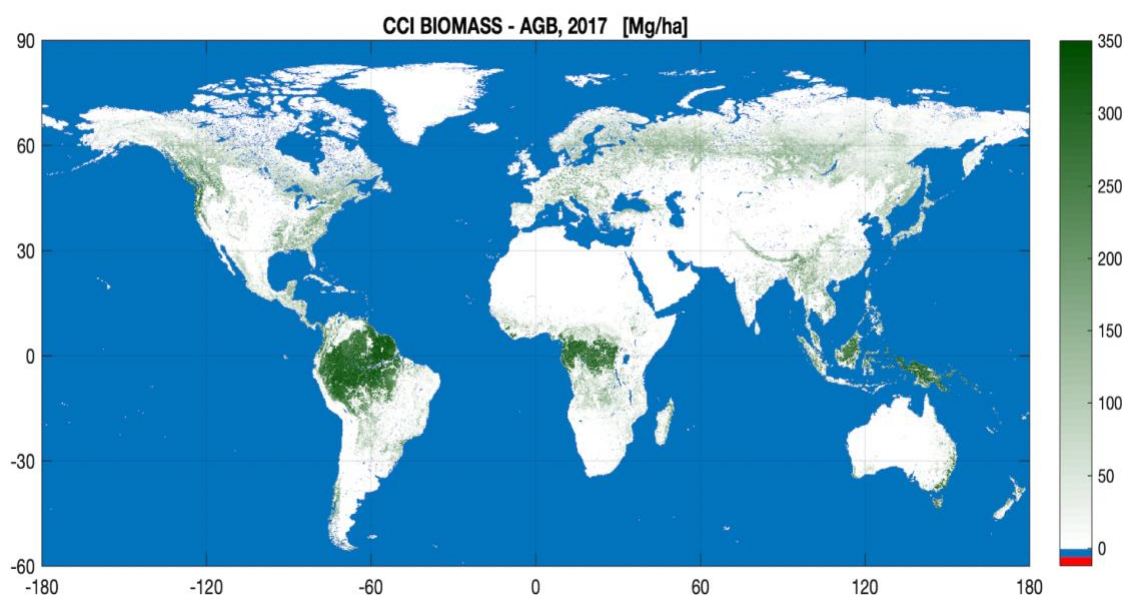


Figura 8: Biomassa mundial (ESA, 2019)

Remoções intensivas em energia, como o DACCS, também encontram condições favoráveis no Sul Global. Para além da biomassa, o Sul Global detém enormes dotações de energia renovável subutilizadas. Só a África possui 60% dos recursos solares premium do mundo, mas menos de 1% da capacidade instalada de solar ([IEA, 2022](#)). E a região ainda recebe menos de 3% do financiamento global para energia limpa. O Quênia já opera uma rede elétrica 90% renovável, quase metade geotérmica ([IEA, 2024c](#)), enquanto Chile e Índia repetidamente estabeleceram recordes globais de eletricidade solar de baixo custo (US\$ 10–27/MWh) ([IEA, 2017](#); [Mercom, 2020](#)). Esses exemplos mostram que, com investimento adequado, o Sul Global poderia abastecer CDR intensivo em energia a custos competitivos, ao mesmo tempo em que impulsiona sua própria descarbonização industrial. Além disso, para o CDR baseado em CCS, o Sul Global detém aproximadamente 1.800–

2.000 GtCO₂ do potencial geológico mundial de 2.700 GtCO₂, o que equivale a cerca de 65-70% da capacidade global ([Gidden, 2025](#)).

Por fim, as regiões tropicais e subtropicais possuem vastas formações de silicatos que posicionam o Sul Global para o *enhanced weathering* (EW). Elas combinam abundantes recursos basálticos (notadamente na Índia, África Oriental e América Latina) com condições de solo quentes, úmidas e ácidas que aceleram a dissolução mineral ([IGSD, 2023](#); [Edwards, 2017](#)). A abundância de biomassa, minerais e energia renovável torna o Sul Global estruturalmente importante para a expansão do CDR durável.

Efeitos Econômicos e de Emprego da CDR no Sul Global

Para além das claras dotações de recursos no Sul Global, é crucial compreender os impactos mais amplos do desenvolvimento de indústrias de CDR em larga escala. Avançamos em quatro etapas: (1) avaliar volumes plausíveis de CDR no Sul Global; (2) estabelecer uma linha de base de intensidade de emprego em economias avançadas e ajustá-la às intensidades de trabalho em países em desenvolvimento; (3) dimensionar o emprego em função dos volumes de remoção; e (4) traduzir esses resultados em impactos econômicos utilizando valores unitários baseados em custos, participações no Valor Agregado Bruto (VAB) e multiplicadores para efeitos de transbordamento.

Volumes de implantação de CDR no Sul Global

Não existe uma estimativa única consensual para o potencial de CDR do Sul Global em meados do século, mas três linhas de evidência sugerem um intervalo amplo de 1,5-5 GtCO₂/ano até 2050. Métodos de alocação proporcional, assumindo que a participação atual de ~45% nas remoções globais seja mantida, produzem esse intervalo quando aplicados às necessidades globais projetadas ([Ranevska, 2025](#)). Estudos tecnológicos *bottom-up* destacam contribuições de BCR, BECCS, EW e DACCS, com totais indicativos entre 3 e 7 Gt, embora sobreposições impeçam uma simples soma³. Por fim, modelagens

³ Verificação bottom-up: Enhanced Rock Weathering (ERW): Beerling et al. (2020) estimam que China, Índia, Brasil, Indonésia e México juntos poderiam fornecer cerca de 0,6-1,3 GtCO₂/ano, dependendo dos níveis globais de implantação ([Beerling et al., 2020](#)). Biochar Carbon Removal: Deng et al. (2024) identificam um potencial de até 0,92 GtCO₂/ano na China ([Deng et al., 2024](#)), enquanto [Lefebvre et al. \(2023\)](#) reportam 1,5 GtCO₂e/ano para países do Sul Global (~0,47 GtCO₂/ano na China, ~0,30 GtCO₂/ano no Brasil e ~0,23 GtCO₂/ano na Índia), resultando em um subtotal de ~1,0-1,5 GtCO₂/ano. BECCS: Não existe uma estimativa consolidada para o Sul Global; contudo, um estudo nacional de sistemas energéticos da China projeta 0,5-1 GtCO₂/ano até 2050, dependendo do cenário ([Huang et al., 2020](#); [Xu et al., 2024](#)), enquanto análises setoriais brasileiras indicam 0,03-0,25 GtCO₂/ano a partir de etanol de cana-de-açúcar e biomassa ([Moreira et al., 2016](#)), e outros países apresentam potenciais de alguns MtCO₂/ano (como Tailândia ou Indonésia; [Suwannakarn & Salam, 2024](#); [Kraxner et al., 2024](#)), sugerindo um potencial total de 0,5-2 GtCO₂/ano (com limites globais sustentáveis em torno de 3 GtCO₂/ano; [Deprez et al., 2024](#)). DACCS: [Fuhrman et al. \(2021\)](#) projetam 1,6 GtCO₂/ano na China, enquanto Breyer et al. (2019) modelam um sistema no Magrebe capaz de ~1 GtCO₂/ano até 2050 ([Breyer et al., 2019](#)), e [Qiu et al. \(2024\)](#) estimam 0,2-0,3 GtCO₂/ano na Arábia Saudita. Somados, esses subtotais bottom-up resultam em aproximadamente 3-7 GtCO₂/ano até 2050 para o Sul Global. Essa estimativa é incerta: omite diversas regiões e opções (como CDR marinho), e a maioria das estimativas nacionais ou tecnológicas assume escalonamento independente. Na prática, as tecnologias competirão por matérias-primas, terra,

de avaliação integrada (Ampah et al., 2025⁴) indicam que o Sul Global poderia fornecer cerca de 5 Gt em exportações de créditos de CDR entre 2050 e 2060. O intervalo amplo, porém plausível, de **1,5-5 GtCO₂/ano** fornece a base volumétrica para a análise deste artigo.

Intensidade de emprego nas economias avançadas e intensidade de mão de obra no Sul Global

Em estudos para a França, Alemanha, Estados Unidos e UE-27, a relação entre implantação de CDR e emprego bruto converge para aproximadamente 700 empregos permanentes por MtCO₂ (dentro de um intervalo de 350-1.000). A inclusão das fases temporárias de construção e investimento eleva esse valor para cerca de 1.000 empregos por MtCO₂ no total⁵. Isso fornece uma linha de base pragmática a partir da qual podem ser feitos ajustes para o Sul Global.

As evidências mostram de forma consistente que as indústrias verdes em economias do Sul Global são mais intensivas em trabalho do que no Norte Global. Usinas solares de grande escala na Europa normalmente geram apenas 2-3 empregos diretos por MW, enquanto sistemas fotovoltaicos distribuídos em países como Índia ou Quênia criam 15-20 empregos (IEA PVPS, 2024). A intensidade de empregos na energia eólica em economias em desenvolvimento é aproximadamente 2 a 10 vezes maior do que na OCDE: o Brasil

energia e armazenamento – e os países por participação de mercado – de modo que mesmo o limite inferior pode superestimar o potencial alcançável.

⁴ Pre-print no momento da redação.

⁵ Para derivar uma regra prática clara, alinhamos estudos nacionais e regionais usando pressupostos metodológicos consistentes. AFEN/BCG (França) e BCG/DVNE (Alemanha) reportam emprego setorial bruto em regime permanente, cobrindo empregos diretos e indiretos ao longo da cadeia de valor do CDR, mas excluindo construção e financiamento de curto prazo. A consolidação da DVNE para a UE-27 segue a mesma convenção, expressando o emprego bruto capturado domesticamente. Em contraste, o Rhodium Group (EUA) aplica um modelo input-output bottom-up (IMPLAN) e distingue explicitamente entre operações e manutenção contínuas ($\approx$ dois terços) e construção temporária ($\approx$ um terço). Com base nessas fontes, utilizamos os resultados da BCG para França e Alemanha sob ambos os caminhos compatíveis com a temperatura ($\leq 2^\circ\text{C}$ e $1,5^\circ\text{C}$) e alinhamos os empregos brutos de 2050 com os volumes correspondentes de CDR (método de portfólio equilibrado da BCG, com uma deriva de produtividade embutida de -2% ao ano). Para a UE-27, um cenário de portfólio equilibrado implica 0,9 GtCO₂ de remoções sustentando 335.000 empregos (≈ 372 empregos/MtCO₂), e um caso de alto volume de 1,9 GtCO₂ associado a 670.000 empregos (≈ 353 empregos/MtCO₂). Na França, os cenários mostram 185 MtCO₂ com 65.000 empregos (≈ 351 empregos/MtCO₂) e 365 MtCO₂ com 130.000 empregos (≈ 356 empregos/MtCO₂). Esses valores convergem em torno de ≈ 360 empregos/MtCO₂ entre geografias e cenários, representando emprego direto + indireto em regime permanente, excluindo construção. Nos Estados Unidos, em base comparável (excluindo construção), os valores resultam em ≈ 630 -870 empregos permanentes/MtCO₂, enquanto França, Alemanha e UE-27 se situam entre ≈ 350 -1.000 empregos/MtCO₂. Harmonizar essas estimativas produz um intervalo consolidado de ≈ 350 -1.000 empregos permanentes por MtCO₂ nas economias avançadas. Reintroduzir a construção temporária usando a proporção de um terço do Rhodium (ou seja, empregos permanentes $\approx \frac{2}{3}$ do total) eleva o intervalo total para aproximadamente ≈ 525 -1.500 empregos/MtCO₂. Esse valor é adotado como linha de base para a intensidade de emprego do CDR em economias avançadas. Isso inclui empregos indiretos: a análise da [UNIDO \(2025\)](#) sobre setores manufatureiros demonstra que cada emprego direto gera 2,2 empregos indiretos e induzidos adicionais, produzindo um efeito total 3,2 vezes maior que o emprego direto isolado. Aplicar esse multiplicador ao intervalo harmonizado de ≈ 350 -1.000 empregos brutos/MtCO₂ gera uma estimativa de ≈ 110 -310 empregos diretos/MtCO₂ (valor central ≈ 225), representando a força de trabalho operacional em regime permanente diretamente empregada nas indústrias de CDR durável.

registra em média 13,5 empregos-ano/MW e a África do Sul 6,5, contra 1-3 nas economias avançadas ([Aldieri et al., 2020](#)). A bioenergia apresenta diferenças ainda maiores: o emprego por unidade de produção atinge níveis 2 a 12 vezes superiores aos da OCDE, com 81 empregos/PJ na América Latina, 60-90 na China e na Índia, e até 387 na África Subsaariana, em comparação com 30-32 nas cadeias de suprimento da OCDE ([Skeer, 2016](#); [Rutovitz et al., 2015](#)).

No entanto, os dados históricos refletem as condições da década de 2010, quando as lacunas de produtividade eram maiores. Modelagens mais sistemáticas de [Ram, Aghahosseini e Breyer \(2020\)](#) projetam que, mesmo em 2050, o Sul Global manterá uma intensidade de emprego direto aproximadamente 1,9 vez superior à das economias avançadas. Aplicar esse multiplicador conservador ao parâmetro de referência das economias avançadas – cerca de 700 empregos permanentes por MtCO₂ – resulta em aproximadamente 1.300 empregos permanentes por MtCO₂. A inclusão das fases temporárias de construção e investimento eleva essa estimativa para cerca de 1.900 empregos brutos por MtCO₂ no Sul Global. Esse ajuste conservador leva em conta a esperada convergência de produtividade, ao mesmo tempo em que reconhece diferenças estruturais persistentes que provavelmente permanecerão até 2050.

Impacto econômico da implantação de CDR

Na UE-27, o valor estimado de uma tonelada de CO₂ removida em 2050 é de aproximadamente US\$ 130⁶. Para estimar o valor econômico gerado, derivamos um valor unitário médio a partir dos cenários europeus do BCG. Esse valor é adotado para os cálculos referentes ao Sul Global.

A receita direta do setor é então ajustada para refletir a contribuição econômica líquida, utilizando as participações no valor agregado bruto (VAB). Estudos sobre indústrias de manufatura ambiental e de energias renováveis em países como México, Ruanda, Indonésia e África do Sul sugerem uma participação de VAB entre 35% e 55%, o que implica US\$ 53-66 por tonelada de CO₂ removida (GGGI, 2020). Para refletir os efeitos de transbordamento nos setores de construção, logística e serviços, aplicamos um multiplicador econômico de 2, consistente com estudos de insumo-produto em economias

⁶ Derivamos um valor unitário médio de portfólio dividindo o potencial econômico baseado em custos da BCG pelos volumes de remoção associados em 2050. Para a UE-27, um potencial econômico de US\$ 120-245 bilhões para 0,9-1,9 gigatoneladas de remoções implica um valor de cerca de US\$ 128-132 por tonelada de CO₂. Para a França, um potencial econômico de US\$ 27-54 bilhões para 185-365 milhões de toneladas de remoções implica um valor de cerca de US\$ 146-149 por tonelada de CO₂. Com base nisso, adotamos um valor unitário de trabalho de US\$ 130 por tonelada de CO₂ para os cálculos subsequentes, alinhado ao intervalo da UE-27.

em desenvolvimento (Jones, 2011; Gabriel et al., 2020)⁷. O efeito combinado eleva o impacto econômico agregado para US\$ 99-143 por tonelada de CO₂ removida.

Resultados

Tabela 1. Potencial de emprego e de geração de valor a partir da CDR no Sul Global até 2050

Global South CDR volume (GtCO ₂ /yr)	Permanent jobs per MtCO ₂ /yr (total)	Gross jobs per MtCO ₂ /yr (total)	Permanent jobs (million)	Gross jobs (million)	Direct Revenue (\$bn/yr)	Economy-wide GVA (\$bn/yr)
1.5	1,300 (650-1,900)	1,900 (1000-2,250)	2.0 (1.0-2.9)	2.9 (1.5-3.4)	195	182 (149-215)
3	1,300 (650-1,900)	1,900 (1000-2,250)	3.9 (2.0-5.7)	5.7 (3.0-6.8)	390	363 (297-429)
5	1,300 (650-1,900)	1,900 (1000-2,250)	6.5 (3.3-9.5)	9.5 (5.0-11.3)	650	605 (495-715)

Em níveis plausíveis de implantação, o CDR poderia se tornar uma fonte relevante de emprego e de geração de valor no Sul Global. Com 3 GtCO₂ por ano, o setor poderia sustentar cerca de 3,9 milhões de empregos permanentes – 5,7 milhões incluindo empregos temporários – e contribuir com US\$ 363 bilhões em VAB anual na economia. Com 5 GtCO₂, esses valores sobem para 6,5 milhões de empregos permanentes, 9,5 milhões incluindo temporários, e US\$ 605 bilhões, enquanto mesmo o limite inferior de 1,5 GtCO₂ gera mais de dois milhões de empregos permanentes e cerca de US\$ 182 bilhões em valor. Para comparação, o setor automotivo sustenta mais de 13 milhões de empregos na UE (diretos + indiretos; [ACEA, 2024](#)) e contribui com US\$ 165-220 bilhões em VAB ([Eurostat, 2024](#)), enquanto nos Estados Unidos sustenta quase 11 milhões de empregos e US\$ 450 bilhões em valor agregado ([AAI, 2025](#); [Harp e Prasad, 2024](#)). Assim, uma indústria de CDR madura, sustentando cerca de 5-10 milhões de empregos e mais de US\$ 500 bilhões em valor, poderia rivalizar com um grande setor industrial do Norte Global.

⁷ Aplicamos uma participação direta de valor agregado bruto (GVA) de 35-55%, consistente com estudos de indústrias verdes no Sul Global. Por exemplo, a implantação de energia renovável no México (~45%), Ruanda (~46-49%) e Indonésia (~38-49%) situa-se claramente nesse intervalo ([GGGI, 2020](#)), enquanto a manufatura ambiental no programa REIPPPP da África do Sul alcançou conteúdo local de 44-54% ([Eberhard et al., 2024](#)). Com base nisso, um valor unitário de trabalho de US\$ 130/t de receita bruta setorial corresponde a cerca de US\$ 53-66 por tonelada de GVA direto.

Para capturar os efeitos indiretos sobre construção, logística e serviços, aplicamos um multiplicador econômico agregado de 2 (intervalo 1,6-2,3), consistente com estudos input-output internacionais para economias em desenvolvimento (Jones, 2011 encontra 2,5 para a China e 1,81 para o Brasil em 35 países; Gabriel et al. encontram multiplicadores de 2,8 para a China, 1,6 para a Índia e 1,8 para o Brasil, com média de 1,9 para países em desenvolvimento; [Jones, 2011](#); [Gabriel et al., 2020](#)). Isso eleva o impacto econômico agregado para aproximadamente US\$ 99-143 por tCO₂.

GLOBAL SOUTH JOB AND ECONOMIC-WIDE GVA IN 2050

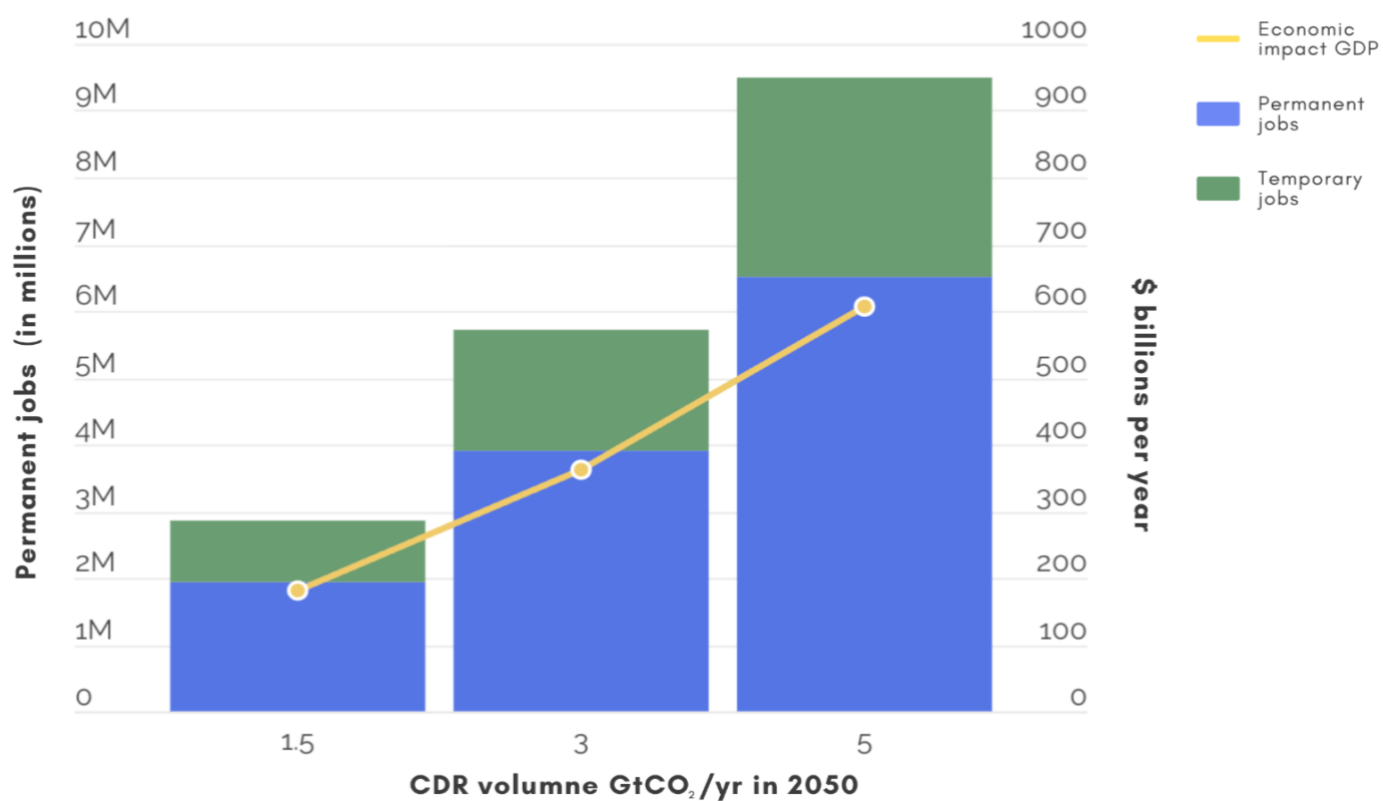
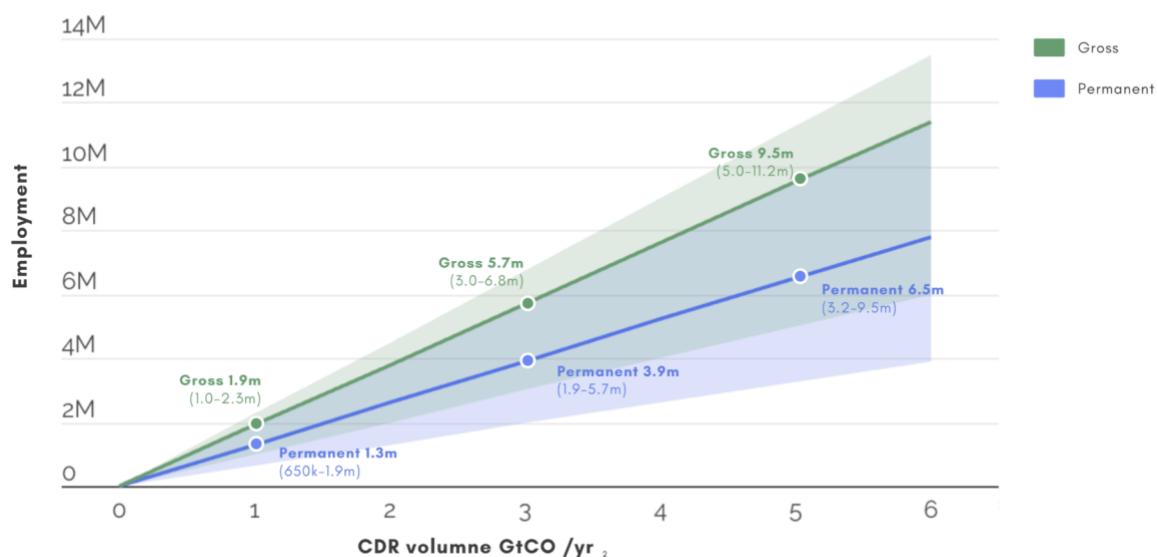


Figura 9: Impacto da CDR no emprego e na economia do Sul Global em 2050

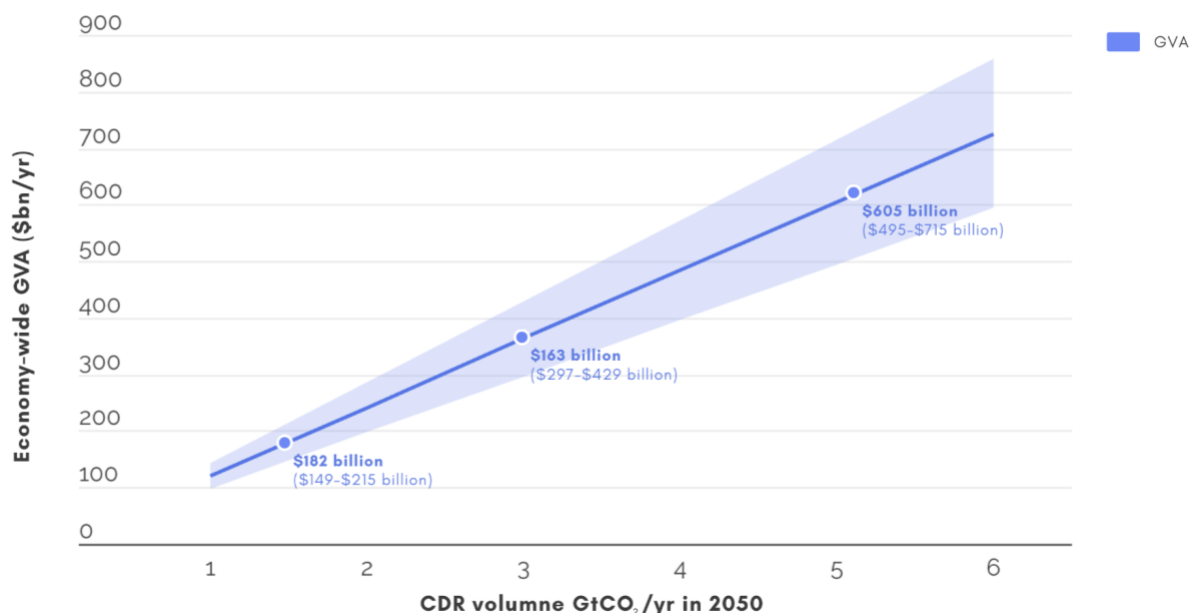
EMPLOYMENT VS CDR VOLUME IN THE GLOBAL SOUTH IN 2050



Notes: Permanent central = 1,300 jobs MtCO₂ range (650-1,900). Gross central = 1,900 jobs/Mt (range 1,000-2,250). Jobs scale linearly with volume.

Figura 10: Criação de empregos pela CDR no Sul Global em 2050

ECONOMIC-WIDE GVA VS CDR VOLUME IN THE GLOBAL SOUTH IN 2050



Notes: GVA per tonne central = \$121 (range \$99-143). Linear scaling with volume.

Figura 11: Impacto econômico da CDR no Sul Global em 2050

Essas estimativas evidenciam que, quando as intensidades de trabalho são ajustadas às condições dos países em desenvolvimento, o potencial de emprego das indústrias de CDR

torna-se considerável. O CDR não é apenas uma ferramenta de mitigação climática, mas também um motor de industrialização e transformação econômica.

Estudos comparativos reforçam essa conclusão. Ampah et al. (2025) estimam que o comércio internacional de CDR poderia criar 17 milhões de empregos e gerar US\$ 3,1 trilhões em transferências financeiras até 2060, em um cenário de 5 GtCO₂ por ano – valores muito superiores aos multiplicadores conservadores utilizados aqui. Embora tais números sejam sensíveis a pressupostos sobre escolha tecnológica, curvas de custo e governança internacional, eles indicam a magnitude da oportunidade caso o Sul Global consiga se posicionar como exportador de CDR.

A implicação estratégica é que a CDR representa uma rara interseção entre responsabilidade climática e oportunidade industrial. Para o Sul Global, desenvolver indústrias de CDR poderia gerar milhões de empregos qualificados, de maior produtividade e melhor remuneração, atrair capital internacional por meio dos mercados de carbono e contribuir para a transformação estrutural de economias atualmente dependentes de exportações de commodities. Para o Norte Global, isso reforça a importância de construir estruturas que permitam a contratação credível e em larga escala de remoções provenientes de países em desenvolvimento, garantindo ao mesmo tempo salvaguardas relativas à terra, à biomassa e aos direitos das comunidades.

Dinâmicas de Trabalho da CDR: Para Além dos Empregos e do PIB, um Instrumento de Redução da Pobreza

O argumento de desenvolvimento para o CDR no Sul Global não se limita a medidas agregadas de emprego ou PIB. Seu maior potencial transformador reside em onde e como os empregos são criados. A pobreza em países em desenvolvimento é desproporcionalmente rural: na África Subsaariana e no Sul da Ásia, cerca de 46% das populações rurais vivem abaixo das linhas nacionais de pobreza, em comparação com aproximadamente 20% nas áreas urbanas ([World Bank, 2024](#)). A África, o continente mais jovem do mundo, adicionará mais de meio bilhão de pessoas à sua força de trabalho até 2050, a maioria em áreas rurais, criando uma necessidade urgente de empregos produtivos e localmente ancorados ([UNDP, 2024](#); [OECD, 2024](#)). Essas mesmas regiões também possuem abundantes resíduos de biomassa e forças de trabalho jovens e subempregadas.

A CDR durável é, essencialmente, um recurso difuso: muitos pequenos núcleos de atividade distribuídos pelas economias rurais, em vez de um único ponto de extração de alta renda. Seus insumos e locais de aplicação são inerentemente dispersos, já que 4 em cada 5 propriedades agrícolas no Sul Global têm menos de dois hectares, ancorando a

produção diretamente à terra ([Lowder et al., 2021](#)). Ao aproveitar resíduos abundantes e uma força de trabalho jovem, a CDR pode ajudar a reduzir desigualdades espaciais e construir indústrias resilientes e enraizadas localmente em todo o Sul Global.

Co-benefícios Climáticos e Ambientais

As indústrias de CDR geram substanciais co-benefícios ambientais, agrícolas e sociais, de alto valor para o Sul Global. Tanto o BCR quanto o BECCS podem enfrentar um desafio crítico de gestão de resíduos ao converter resíduos agrícolas – e até lodo de esgoto – em produtos úteis, em vez de poluentes. Juntos, podem ajudar a eliminar a queima a céu aberto, uma importante fonte de poluição do ar rural (responsável por 43% das mortes por doenças respiratórias crônicas e 17% das mortes por infecções pulmonares; [WHO, 2024](#)) e de risco de incêndios florestais, ao mesmo tempo em que estabilizam carbono e geram valor a partir da biomassa. Converter resíduos como a palha de arroz em biochar reduz as emissões ao longo do ciclo de vida em 14-26% e diminui o metano proveniente da compostagem de esterco em até 79% ([Patel et al., 2023](#); [Harrison et al., 2022](#)). O biochar demonstrou melhorar a função do solo: meta-análises recentes e anteriores reportam ganhos de produtividade entre 5-51% ([Jiang et al., 2024](#); [Li et al., 2024](#)) e até 25,6% de aumento na retenção de água em solos arenosos ([Wei et al., 2023](#)), além de reduzir metais pesados como chumbo e cádmio em cerca de 40%, diminuindo riscos à saúde humana em 30% ([Chen et al., 2018](#)). Adicionalmente, o BECCS fortalece a resiliência rural ao transformar resíduos dispersos em energia firme e de baixo carbono, enquanto captura CO₂ na fonte ([Moreira et al., 2016](#)).

O ERW pode fortalecer a saúde e a resiliência do solo. A aplicação de basalto finamente moído ou rocha solicitada em áreas agrícolas pode elevar o pH do solo em 0,2-1,2 unidades e fornecer cálcio, magnésio e potássio, o que pode melhorar a fertilidade em solos ácidos ou degradados ([Beerling et al., 2020](#); [Skov et al., 2024](#)). Ensaio em regiões tropicais e temperadas mostram melhor estrutura do solo, raízes mais fortes e aumentos de produtividade entre 6-21%, além de menor necessidade de fertilizantes devido à liberação mais lenta de nutrientes e à redução da lixiviação de nitrogênio ([Vienne et al., 2022](#); [Skov et al., 2024](#)). Os efeitos dependem do contexto (tipo e dose da rocha, solo e cultura, clima), e os benefícios podem levar tempo para se materializar. Nesse sentido, o ERW pode funcionar como um corretivo de baixo custo capaz de melhorar a tolerância à seca e sustentar a produtividade, especialmente em solos tropicais ácidos e altamente intemperizados.

Por fim, o DACCS, apesar de sua maior intensidade de capital, pode atuar como uma carga flexível e responsiva ao preço, operando durante períodos de excedente de energia eólica ou solar para reduzir o vertimento e apoiar a confiabilidade do sistema. Estudos recentes

de otimização demonstram operações de DACCS alimentadas por excedentes eólicos e com flexibilidade de processo, reforçando o argumento de que sua integração à rede agrega valor para além da própria CDR ([Liu et al., 2025](#); [Arwa et al., 2025](#)). Além disso, o DACCS pode criar uma demanda de base que estimule a expansão adicional de energia renovável e, assim, ampliar o acesso à energia em comunidades locais ([Qiu et al., 2022](#)).

A Diversidade da CDR: Uma Força para o Sul Global

O valor de desenvolvimento do CDR depende, em última instância, de como ele é implantado. A literatura sobre tecnologia apropriada enfatiza que a difusão sustentável – a disseminação de uma tecnologia adequada ao seu contexto – ocorre quando novas indústrias se alinham às infraestruturas, às competências e às bases de recursos locais (Fu e Shi, 2022; Lema, Fu e Rabellotti, 2020). No Sul Global, esse princípio aponta para um portfólio diversificado de rotas de CDR. Cada uma opera em escalas e intensidades de infraestrutura distintas, permitindo que os países combinem tecnologias com suas vantagens comparativas. BCR e BECCS podem ancorar indústrias descentralizadas e intensivas em trabalho, baseadas em resíduos agrícolas e de biomassa, enquanto o ERW pode fortalecer redes existentes de mineração e transporte ([Woolf et al., 2016](#); [Sanei et al., 2024](#); [Whitehead, 2025](#)).

Como argumenta [Lebdioui \(2024\)](#), a industrialização verde não pode seguir um único roteiro. Tentar replicar trajetórias tecnológicas do Norte Global corre o risco de uma falácia de composição, na qual países competem pelo mesmo nicho em vez de construir sobre suas vantagens comparativas. A CDR, por contraste, abre um portfólio de caminhos industriais diferenciados. Economias ricas em biomassa, como Brasil ou Indonésia, podem priorizar BECCS e BCR; regiões com abundância mineral, como Índia, Brasil ou Quênia, podem avançar em EW; e países com renováveis baratas e abundantes – Quênia, Chile, Marrocos, Brasil, Namíbia – podem se posicionar para o DACCS.

Essa diversidade pode ser um ativo: ela permite que economias retardatárias capturem segmentos complementares da cadeia de valor emergente do CDR. Ao adaptar a implantação ao contexto, o CDR pode tornar-se um motor de industrialização apropriada, criando empregos rurais, fomentando aprendizado tecnológico e conectando mitigação climática com desenvolvimento.

4. Estudos de Caso por País: Lições Aprendidas de Bolívia, Brasil e Quênia

Para explorar como a CDR durável pode atuar como motor de industrialização, três estudos de caso nacionais foram desenvolvidos a partir de entrevistas e dados operacionais coletados entre agosto e outubro de 2025. Eles destacam configurações contrastantes de propriedade e capital. Na Bolívia, a **Exomad Green** é uma empresa boliviana, de

propriedade e financiamento nacionais, parte do Exomad Group – o maior exportador de produtos florestais do país – que expandiu suas atividades para o CDR ao converter resíduos lenhosos locais em BCR verificado. No Brasil, a **NetZero** opera instalações de BCR com capital europeu, mas com uma força de trabalho quase totalmente doméstica. No Quênia, a **Octavia Carbon** combina tecnologia internacional com uma equipe liderada localmente para implantar DACCS em meio a um quadro regulatório em rápida evolução, conforme confirmado em discussões com o **Gabinete do Enviado Especial para Mudanças Climáticas**. Em conjunto, esses estudos de caso mostram como diferentes configurações de capital, trabalho e governança estão moldando a primeira geração de indústrias de CDR no Sul Global.

Bolívia – Exomad Green

A Bolívia ilustra como uma indústria viável de remoção de carbono pode emergir antes que os marcos regulatórios estejam plenamente consolidados. A agricultura representa cerca de 13% do PIB e 27% do emprego, enquanto as operações florestais geram mais de 3,8 Mt de resíduos por ano ([ITA, 2024a](#); [CEIC, 2024](#); [Morato et al., 2019](#)). O país criou apenas recentemente uma base regulatória para a monetização de carbono: a Decisão Constitucional 040/2024 e o Decreto Supremo 5264 autorizaram explicitamente a venda de créditos de carbono e estabeleceram regras para o acesso ao financiamento climático ([Sánchez, 2025](#); [Climate Laws, 2024](#)).

A Exomad Green converte resíduos de serrarias provenientes de manejo sustentável – anteriormente queimados ou descartados em rios – em biochar alinhado com critérios de sustentabilidade para CDR baseado em biomassa. A empresa já entregou mais de 202.000 toneladas de remoções verificadas de carbono (com capacidade atual de 120 ktCO₂/ano), tornando-se a maior fornecedora mundial de CDR durável até o momento (CDR.fyi, 2025b). Em maio de 2025, a empresa assinou um contrato de offtake de 10 anos com a Microsoft para pelo menos 1,24 milhão de tCO₂, um dos maiores acordos de CDR do mundo. O valor do contrato deve situar-se entre US\$ 120–180 milhões (com preços de BCR entre US\$ 100–150/t) ([S&P, 2025b](#)). Mais de 12.000 hectares já foram tratados com biochar, elevando a produtividade em cerca de 25% nos solos tratados. A Exomad Green emprega aproximadamente 200 pessoas diretamente e cerca de 200 indiretamente, apoiando cerca de 500 famílias por meio de programas de educação, saúde e iniciativas comunitárias (o que representa 3.000–4.000 empregos/Mt, em linha com nossas estimativas). Monitoramentos de saúde ao redor das serrarias mostram uma redução de 83% nos casos de conjuntivite e de 89% em infecções respiratórias após o fim da queima de resíduos ([Exomad Green, 2025](#)).

As limitações da Exomad são financeiras, não técnicas: a Bolívia carece de instrumentos domésticos de investimento, e a expansão depende, portanto, de acesso contínuo a

compradores internacionais e a sistemas de certificação. A trajetória da Exomad Green demonstra que, quando padrões globais e acesso a mercados se alinham, países ricos em recursos podem transformar fluxos de resíduos em emprego rural, benefícios de saúde e valor industrial durável. Cumprir seu contrato de 1,24 MtCO₂ ajudaria a Exomad Green a sustentar cerca de 800–1.000 empregos⁸ totais ao longo da década, com base em sua atual intensidade de trabalho de aproximadamente 3.000–4.000 empregos por Mt, consolidando a posição da Exomad como líder global em CDR.

Brasil - NetZero

O Brasil possui, possivelmente, uma das bases mais sólidas para a CDR em larga escala. O país produz entre 600–770 Mt de resíduos agrícolas por ano ([Alves et al., 2023](#)), oferecendo abundante matéria-prima para BCR e BECCS. Também detém cerca de 17% da biomassa acima do solo global ([Fendrich et al., 2025](#); [Flores et al., 2024](#))⁹ e possui uma matriz elétrica que já é aproximadamente 89% renovável, criando condições favoráveis tanto para remoções baseadas em biomassa quanto para remoções intensivas em energia. Para ERW, o Brasil já conta com marcos habilitadores – a regulamentação da Rochagem e o Plano Nacional de Fertilizantes – mas a implantação permanece aquém do potencial ([MAPA, 2017](#); [MAPA/PNF, 2022](#)). A produção registrada de remineralizadores foi de cerca de 3 Mt em 2021–2022, com aproximadamente 3 milhões de hectares em uso em 2022 e um acumulado de 7,34 milhões de hectares em cinco anos ([Embrapa, 2024](#); [Embrapa, 2022](#)). Enquanto isso, o Brasil importa cerca de 85% de suas necessidades de fertilizantes e importou aproximadamente 42 Mt em 2023 – uma dependência que o ERW poderia ajudar a reduzir ao substituir insumos importados por recursos basálticos locais ([ANBA, 2025](#)). Além do ERW, formações favoráveis de armazenamento geológico de CO₂ na Bacia do Paraná – incluindo o aquífero salino Rio Bonito, com capacidade estimada entre ~12–117 GtCO₂ – juntamente com uma rede elétrica rica em renováveis (88,2% em 2024) reforçam a viabilidade do DACCS ([Lap et al., 2023](#); [EPE, 2025](#)). Projetos-piloto iniciais, de cerca de 300 tCO₂ ano⁻¹ em Porto Alegre e até ~5 ktCO₂ ano⁻¹ em Salvador, demonstram viabilidade e um caminho para a formação de hubs à medida que os marcos regulatórios amadurecem ([PUCRS, 2024](#); [SENAI, 2023](#)).

Entre as empresas que estão surgindo nesse ecossistema está a NetZero, sediada em Minas Gerais, exemplificando como capacidades industriais domésticas podem se formar em torno do CDR. A empresa projeta e fabrica seus próprios sistemas de BCR, ferramentas de

⁸ Assumindo que as capacidades aumentem para entregar o contrato com a Microsoft: 400 empregos existentes, com a adição de 400–500 novos empregos decorrentes do acordo da Microsoft de 0,124 Mt/ano por dez anos.

⁹ Trabalhos recentes estimam que a Amazônia armazena ~102 ± 26 PgC, cerca de 28% do carbono acima do solo (AGC) global. Com ~60% da Amazônia localizada no Brasil, isso implica ~17% apenas da Amazônia brasileira. Ao adicionar os biomas não amazônicos do Brasil (Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal, manguezais), que possuem densidades de carbono mais baixas, o total nacional fica modestamente acima de 17% ([Fendrich et al., 2025](#); [Flores et al., 2024](#)).

MRV e programas de P&D agrônômica. Uma única planta de médio porte, produzindo 3.000-4.000 toneladas de biochar por ano – equivalentes a 8.000-11.000 tCO₂ de remoções verificadas – sustenta cerca de 25 empregos diretos e 25 indiretos, ou 4.500-6.000 empregos por MtCO₂, geralmente com salários 1,5 vez superiores aos níveis locais. A NetZero pretende remover 5 milhões de toneladas de CO₂ até 2030 por meio da implantação em larga escala de seus sistemas modulares, o que poderia sustentar entre 5.000 e 30.000 empregos, dependendo da intensidade de trabalho. Cerca de 90% de sua força de trabalho é brasileira, metade em P&D ou engenharia, com muitos funcionários fazendo a transição de ocupações informais – como mecânica ou trabalho agrícola – para funções industriais qualificadas. Em fazendas parceiras, a empresa relata aumentos de produtividade entre 15-50%, chegando por vezes a dobrar em sistemas com baixo uso de fertilizantes, enquanto a recuperação integrada de calor reduz tanto o consumo de combustível quanto a poluição por partículas. Em 2025, a NetZero conquistou US\$ 15 milhões como segunda colocada na competição internacional XPRIZE CDR, de US\$ 100 milhões – sendo a única empresa de BCR entre as vencedoras ([XPRIZE, 2025](#)) – sinalizando credibilidade técnica e competitividade global. Seu modelo de propriedade, com capital europeu combinado a uma força de trabalho totalmente nacional, ilustra como o capital estrangeiro pode ancorar capacidades locais quando a governança é clara e previsível.

O arcabouço regulatório do Brasil ainda não corresponde ao seu potencial. O SBCE (Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões), a futura lei nacional de mercado de carbono, estabelece a estrutura para um sistema regulado de comércio de emissões, mas elementos-chave de desenho permanecem indefinidos. Em particular, a legislação não apresenta disposições claras para remoções duráveis de carbono, e a sobreposição de instâncias de supervisão com processos lentos de licenciamento desestimula investidores. Apesar do impulso pela ‘reindustrialização verde’, o Brasil carece de habilitadores centrais – taxonomia, compras públicas e financiamento direcionado. A experiência da NetZero mostra que a principal limitação é a incerteza regulatória, não a escassez de financiamento. A inclusão explícita de remoções nas regras do SBCE, o licenciamento simplificado e incentivos à P&D poderiam apoiar um cluster industrial semelhante ao boom do etanol nos anos 1980. Em paralelo, transações do Artigo 6.2 poderiam fornecer uma fonte complementar de receita ao permitir a exportação de remoções verificadas para as NDCs de outros países. Um reconhecimento internacional mais amplo das remoções certificadas do Sul Global – particularmente no âmbito do CRCF da União Europeia – canalizaria investimentos para onde os custos são mais baixos e os co-benefícios mais elevados, transformando as dotações naturais do Brasil em um setor estratégico de exportação de remoções de carbono de alta integridade.

Quênia – Octavia Carbon

O Quênia parece bem posicionado para avançar em CDR. Mais de **93%** de sua eletricidade já provém de fontes renováveis, principalmente geotérmica, e a geologia do Vale do Rift oferece significativo potencial de armazenamento para CO₂ capturado ([ITA, 2024b](#); [IEA, 2024d](#)). A agricultura contribui com cerca de 22% do PIB e aproximadamente 33% do emprego, com mais de 70% dos domicílios rurais envolvidos em atividades agrícolas ([KNBS, 2025](#); [World Bank, 2025b](#); [MIGA/World Bank, 2025](#)). Essas condições tornam o país favorável tanto ao uso de resíduos agrícolas quanto ao DACCS, alimentado por energia de baixo carbono e apoiado por bacias de armazenamento próximas; ainda assim, remoções permanecem ausentes de sua NDC e não são reconhecidas como um setor distinto.

Fundada em 2021 em Nairóbi, a **Octavia Carbon** tornou-se a desenvolvedora de DACCS mais avançada da África. Em três anos, criou mais de 60 empregos permanentes e 100 temporários; 98% de sua equipe é queniana, e mais da metade ocupa funções técnicas, como engenharia, pesquisa ou montagem. Parcerias com instituições de educação técnica e formação profissional (TVET) resultaram em aprendizes que hoje atuam como instrutores. A empresa planeja expandir de aproximadamente 100 tCO₂ por ano para 1.000 tCO₂ até 2027, sustentando centenas de empregos e uma nova cadeia de suprimentos doméstica em engenharia e manufatura. Iniciativas comunitárias – bancos de absorventes, programas esportivos, parcerias com escolas – têm fortalecido a aceitação social e mitigado receios de que o Quênia pudesse se tornar um campo de testes para tecnologias estrangeiras.

O arcabouço de políticas é incipiente, mas avança. O Climate Change (Amendment) Act de 2023 e as Carbon Markets Regulations de 2024 criaram um registro nacional e regras de repartição de benefícios que destinam até 40% das receitas de projetos baseados em terra para comunidades locais. A supervisão cabe à National Environment Management Authority (NEMA). Segundo Faith Temba, do Gabinete do Enviado Especial para Mudanças Climáticas, o CDR está integrado ao arcabouço mais amplo de mercado de carbono do Quênia – liderado pelo Ministério do Meio Ambiente e supervisionado pela NEMA – embora ainda não esteja refletido na NDC. Ela descreveu uma abordagem de sequenciamento em que a política segue a atividade e destacou três prioridades a serem exploradas: uma estratégia nacional de CDR, a inclusão nas NDCs e uma whitelist do Artigo 6 para viabilizar o comércio bilateral. Ela enfatizou a necessidade de maior engajamento da indústria e observou que o reconhecimento precoce por parte de estruturas da UE e dos EUA ajudaria a catalisar investimentos e validar os esforços domésticos.

O caso do Quênia mostra que, onde existem capacidade técnica e recursos, os principais entraves são consciência institucional e coordenação. A direção política e a validação externa determinarão se sua atual fase de ‘permissão para inovar’ evoluirá para uma

estratégia industrial plena. Se isso ocorrer, o Quênia poderá se tornar o primeiro país africano a vincular CDR durável à manufatura doméstica e à inovação intensiva em energia.

Intensidade de Emprego e Co-benefícios

A implantação inicial de CDR no Sul Global é marcadamente intensiva em mão de obra e enraizada localmente. As estimativas atuais variam de aproximadamente 3.000 a 15.000 empregos por MtCO₂ de capacidade para projetos de BCR, como Exomad Green e NetZero, chegando a razões consideravelmente mais altas para iniciativas emergentes de DACCS, como a Octavia Carbon¹⁰. Embora esses valores devam diminuir à medida que as operações ganham escala, eles confirmam que nossas projeções de emprego para o Sul Global – 2 a 9 milhões de postos de trabalho em 2050 – são conservadoras, especialmente para tecnologias rurais baseadas em biomassa e outros tipos de matéria-prima.

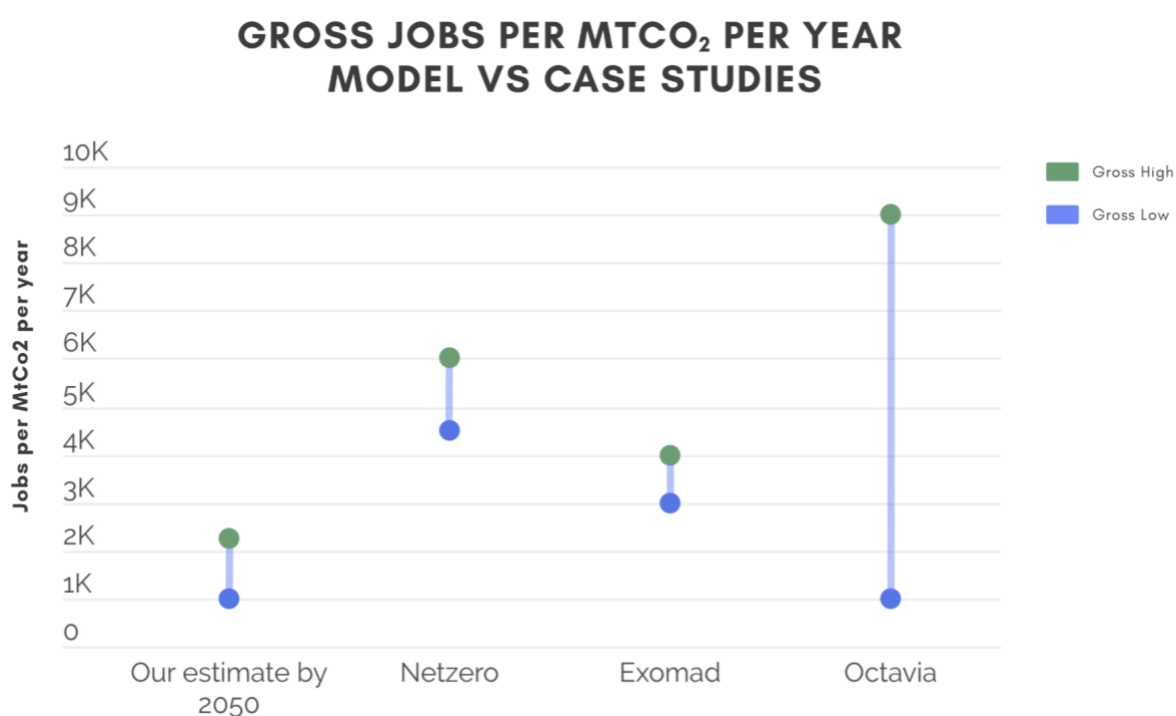


Figura 12: Empregos por MtCO₂ (Estudos de caso)

Os casos também corroboram nossa análise mais ampla de co-benefícios: projetos de CDR geram ganhos locais tangíveis – diversificação de renda, formação de competências,

¹⁰ As estimativas atuais para a Octavia indicam centenas de milhares de empregos por MtCO₂, refletindo seu caráter inicial e não uma indústria de DAC madura. À medida que o setor escala, a intensidade de mão de obra diminuirá – DAC não é inerentemente intensivo em trabalho e provavelmente criará menos empregos por tonelada do que BCR –, mas o rápido crescimento da Octavia atualmente inflaciona suas razões de emprego. Se a empresa alcançar seu objetivo de escalar para centenas de milhares de toneladas removidas no início da década de 2030, com apenas algumas centenas de funcionários, isso se traduziria em apenas alguns milhares de empregos por MtCO₂ (por exemplo, 300-900 empregos para 100-500 quilotoneladas corresponderiam a aproximadamente 1.000-9.000 empregos por MtCO₂), consistente com as expectativas para uma indústria de DAC em maturação.

melhorias de saúde e investimento comunitário – muito antes de atingirem escala industrial. Em conjunto, eles ilustram como o CDR durável pode evoluir para um motor de desenvolvimento, conectando mitigação climática com crescimento inclusivo e industrialização rural em todo o Sul Global.

5. Riscos Renovados de Extrativismo

A expansão das tecnologias de CDR no Sul Global representa uma oportunidade significativa de liderança climática, mas também o risco de um novo extrativismo caso as salvaguardas sociais, políticas e tecnológicas sejam frágeis. Embora o CDR durável possa gerar desenvolvimento industrial e infraestrutura verde, uma implantação mal governada pode reproduzir desequilíbrios históricos no uso da terra, na captura de valor e na dependência tecnológica.

A demanda de biomassa em larga escala para CDR corre o risco de pressionar os mercados de terra e deslocar a produção de alimentos se ultrapassar o uso de resíduos genuínos. Avaliações multimodelo mostram que uma mitigação fortemente baseada em bioenergia, sem salvaguardas, pode elevar os preços globais de alimentos e colocar entre 50 e 170 milhões de pessoas em risco de fome até 2050, com os efeitos mais severos na África Subsaariana e no Sul da Ásia ([Hasegawa et al., 2018](#); IPCC, 2022). A expansão irrigada de bioenergia também pode dobrar a área e a população expostas a estresse hídrico severo ([Stenzel et al., 2021](#); [Bonsch et al., 2016](#)). Essas pressões são agravadas pela insegurança fundiária, citada pelo IPCC (2019) como uma barreira à mitigação equitativa. Avaliações de sustentabilidade estimam que, embora a CDR baseada em terra pudesse, em teoria, ocupar 4-6 Gha, limites de biodiversidade, alimentos e água reduzem a implantação viável para 0,5-1 Gha, limitando o BECCS a 1-2 GtCO₂ por ano e exigindo 2.000-4.000 km³ por ano de água doce ([Deprez et al., 2024](#)). Nesse contexto, leis domésticas robustas são cruciais para evitar o uso insustentável de biomassa. A Lei Florestal n° 1700 da Bolívia (1996) exige planos de manejo florestal aprovados, restringe a colheita a zonas de produção autorizadas e reconhece direitos de uso comunitários e indígenas. Consequentemente, estruturas de CDR estão incorporando salvaguardas de biomassa, como no CRCF da União Europeia, onde as matérias-primas devem cumprir os critérios da RED III (European Commission, 2025a). Ainda assim, sem governança sólida, persistem riscos de 'green grabbing' ([Fairhead et al., 2012](#)) e de captura desigual de valor ([Günther et al., 2022](#); [Nawaz et al., 2025](#)).

Para além da terra e da biomassa, pode emergir uma forma mais recente de extrativismo por meio do controle sobre propriedade intelectual e sistemas de governança. Análise recente do [Rhodium Group \(2025b\)](#) mostra que patentes de tecnologias essenciais de DACCS – solventes, contactores e calcinadores – estão concentradas em um pequeno

número de empresas, elevando barreiras à difusão e reforçando a dependência tecnológica. Assimetrias semelhantes de governança surgem quando infraestruturas de medição, verificação e certificação permanecem sob controle do Norte Global, canalizando valor para auditores estrangeiros e excluindo produtores do Sul de mercados regulados (Sovacool et al., 2023).

Por fim, o desajuste tecnológico pode tornar-se, ele próprio, um vetor de extrativismo. Sistemas avançados de CDR implantados em regiões sem energia ou infraestrutura suficientes – como DACCS em áreas com redes fracas ou intensivas em carbono – podem depender de tecnologia importada e financiamento externo, ao mesmo tempo em que consomem energia de baixo carbono já escassa. Isso cria o risco de aprofundar a dependência e gerar ativos ociosos, dado que o DACCS requer centenas de quilowatt-hora de eletricidade e vários gigajoules de calor por tonelada de CO₂ capturada (Qiu, 2022).

6. Implicação para Políticas Públicas

Para o Sul Global, o CDR deve ser concebido não apenas como um instrumento climático, mas como um setor industrial em si, capaz de gerar emprego, difusão tecnológica e oportunidades de exportação, além dos benefícios de mitigação. O desafio é formular políticas que integrem o CDR às estratégias nacionais de desenvolvimento. O que distingue os pioneiros bem-sucedidos é a capacidade de coordenar medidas fiscais, tecnológicas e institucionais em torno de uma missão de longo prazo coerente, em linha com as abordagens recentes de política industrial orientada por missões (UNIDO, 2023; Mazzucato et al., 2024).

O primeiro passo é uma **análise do potencial doméstico de CDR**. Os países precisam de uma compreensão precisa de sua base de recursos e de suas vantagens comparativas: resíduos de biomassa que possam sustentar BCR ou BECCS, energia renovável para DACCS, formações geológicas adequadas para armazenamento e a aptidão dos solos agrícolas para BCR ou ERW. Um mapeamento estruturado das dotações biológicas, minerais e energéticas pode orientar o planejamento de infraestrutura e reduzir o risco de desalinhamento tecnológico. Esse exercício diagnóstico deve quantificar o potencial anual viável de remoção, identificar corredores industriais prioritários e vincular a disponibilidade de recursos à logística, aos sistemas energéticos e às competências.

Uma segunda prioridade é a **clareza regulatória e a integridade da certificação**. O Regulamento Europeu de Remoção e Agricultura de Carbono (CRCF) está se consolidando como referência para definir o que constitui uma remoção certificada, de alta qualidade e

durável. Sua influência provavelmente se estenderá muito além dos mercados europeus, de modo semelhante ao GDPR, que se tornou o padrão global para proteção de dados (Ryngaert, 2020). Alinhar os sistemas domésticos de certificação aos princípios do CRCF – permanência, adicionalidade e responsabilidade – maximizaria o acesso futuro a mercados, ao mesmo tempo em que forneceria credibilidade aos atores nacionais. Os países em desenvolvimento devem incorporar esse conjunto de políticas dentro de uma estratégia nacional mais ampla de CDR, que defina responsabilidades institucionais, estabeleça metas específicas para CDR e ofereça diretrizes para uma expansão customizada da indústria local.

A terceira prioridade diz respeito à **arquitetura fiscal e financeira** necessária para mobilizar investimentos iniciais em CDR. Esses projetos são intensivos em capital e expostos a riscos de política e de preço, tornando essencial o apoio público direcionado. Créditos fiscais de investimento, depreciação acelerada e subsídios de CAPEX podem reduzir os custos de financiamento em 20-30% e atrair participação privada (USDA, 2023). Exemplos como o 45Q dos Estados Unidos e o CCUS ITC do Canadá demonstram o impacto dos incentivos fiscais, enquanto o NECCS Fund da Dinamarca e os contratos de BECCS da Suécia mostram como mecanismos apoiados pelo Estado podem viabilizar o financiamento de grandes projetos. Os CCfDs do Reino Unido ilustram ainda como contratos de offtake de longo prazo fornecem estabilidade de receita e integram a demanda voluntária. Para o Sul Global, linhas de crédito via bancos nacionais de desenvolvimento e mecanismos de blended finance com elementos concessionais ou de *first-loss* serão fundamentais para atrair capital privado e incorporar o CDR às estratégias industriais nacionais.

Quarto, a **integração aos mercados internacionais** oferece uma fonte estrutural de demanda. O Artigo 6.2 do Acordo de Paris fornece um arcabouço já operacional para a transferência de remoções verificadas como resultados de mitigação internacional (ITMOs). Acordos bilaterais sob o Artigo 6.2 podem monetizar CDR certificada em larga escala e ancorar fluxos de receita externa de longo prazo. Observa-se uma abertura clara para créditos internacionais no Norte Global, uma oportunidade que o Sul Global deve aproveitar por meio do Artigo 6.2. Pela primeira vez, a proposta da Comissão Europeia para a meta climática de 2040 prevê explicitamente o uso limitado de créditos internacionais de alta qualidade sob o Artigo 6 (a partir de 2036 e limitado a 3% das emissões da UE; [European Commission, 2025e](#)). Criar *'whitelists'* nacionais claras de metodologias elegíveis e tecnologias pré-aprovadas ajudaria os governos a manter a integridade enquanto facilita o comércio.

Quinto, **reformas de governança e de licenciamento** permanecem essenciais. A sobreposição de responsabilidades administrativas, os longos prazos de aprovação e

classificações ambientais inconsistentes frequentemente atrasam a implementação de projetos. *'Green industry desks'* interministeriais dedicados, procedimentos de licenciamento harmonizados e isenções para importações essenciais podem reduzir substancialmente os custos de transação. Políticas de localização que concentrem atividades de CDR em zonas agroindustriais ou corredores de energia renovável podem gerar emprego e permitir que pequenas e médias empresas participem da criação de valor.

Por fim, é igualmente importante **desenvolver ecossistemas de competências e pesquisa**. A industrialização do CDR depende de uma força de trabalho tecnicamente qualificada, de capacidade laboratorial e de colaboração público-privada contínua. Governos e universidades devem cofinanciar laboratórios de MRV e instalações de teste, ao mesmo tempo em que incorporam CDR nos currículos de engenharia e agricultura. Parcerias com instituições do Norte Global podem apoiar o desenvolvimento de metodologias e programas de pesquisa conjunta, garantindo simultaneamente credibilidade e fortalecimento da capacidade local.

Se estruturada em torno desses princípios – precisão diagnóstica, integridade regulatória, mobilização financeira, cooperação internacional, licenciamento simplificado e formação doméstica de competências – a CDR pode evoluir para um pilar da industrialização verde, contribuindo simultaneamente para a mitigação climática durável e para o desenvolvimento econômico amplo.

7. Conclusão: Uma Oportunidade de Industrialização Negligenciada

A CDR pode ser o próximo motor de industrialização para o Sul Global. A implantação de 3-5 GtCO₂ por ano até 2050 poderia sustentar entre 3 e 9,5 milhões de empregos permanentes e gerar €300-550 bilhões em valor agregado anual. Capturar esse potencial exige ação coordenada: o Sul Global deve transformar seus resíduos, minerais e fontes renováveis em ativos produtivos por meio de roteiros claros, incentivos ao investimento e ecossistemas de competências, enquanto o Norte Global deve abrir seus mercados e sistemas de certificação para remoções verificadas do Sul Global. Reconhecer essas remoções nos marcos regulatórios da UE e dos EUA, e cofinanciar MRV e capacitação, reduziria os custos globais de abatimento e apoiaria a prosperidade compartilhada. A CDR pode tanto reproduzir assimetrias quanto reequilibrá-las, transformando a política climática em uma verdadeira estratégia de desenvolvimento. A próxima revolução verde pertencerá àqueles que vincularem remoção de carbono a oportunidades industriais, em condições equitativas entre Norte e Sul Globais.

Referências:

1. Abegg, M., Clulow, Z., Nava, L. and Reiner, D.M. (2024) 'Expert insights into future trajectories: assessing cost reductions and scalability of carbon dioxide removal technologies', *Frontiers in Climate*, 6:1331901 [Original Research]. <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2024.1331901/full>
2. ACEA (2024) 'Automotive sector: direct and indirect employment in the EU', ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. <https://www.acea.auto/figure/automotive-sector-direct-and-indirect-employment-in-the-eu/>
3. AAI - Alliance for Automotive Innovation (2025) 'Driving the U.S. economy - Auto Employment: direct, indirect, and induced jobs', The Industry. <https://www.autosinnovate.org/initiatives/the-industry>
4. Aldieri, L., Grafström, J., Sundström, K., & Vinci, C. P. (2020) Wind power and job creation. *Sustainability*, 12(1), 45. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/45#:~:text=S%C3%B6derholm%20,59%20induced%20jobs%20per%20MW>
5. Alves, J.L., de Souza, S.N.M., et al. (2023) 'Agricultural residues and biomass potential in Brazil', *Energies*, 16(9), 3959. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3959>
6. Ampah, J.D., Jin, C., Liu, H., Yao, M., Ge, Z., Afrane, S., Apeaning, R.W., Zhang, X., Xingying, Z., Adun, H., Fuhrman, J., Ou, Y., Kyle, P., Morrow, D., Ho, D.T., Rogelj, J. and McJeon, H. (2025) Carbon removal trading can promote economic growth in the Global South but could undermine food and energy security. Preprint, July 2025. https://www.researchgate.net/publication/393453040_Carbon_removal_trading_can_promote_economic_growth_in_the_Global_South_but_could_undermine_food_and_energy_security
7. ANBA - Carrieri, M. (2025) 'Brazil's multiple harvests drive fertilizer demand', ANBA - Brazil-Arab News Agency, 3 September. <https://anba.com.br/en/brazils-multiple-harvests-drive-fertilizer-demand/>
8. Arwa, E.O. and Schell, K.R. (2025) 'Impact of direct air capture process flexibility and response to ambient conditions in net-zero transition of the power grid', *Applied Energy*, 386, 125549. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192500279X>
9. Azzi, E.S., Li, H., Cederlund, H., Karlton, E. and Sundberg, C. (2024) Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. *Geoderma*, 441, pp.116761-116761. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116761>.

10. Babiker, M., Berndes, G., Blok, K., Cohen, B., Cowie, A., Geden, O., Ginzburg, V., Leip, A., Smith, P., Sugiyama, M. and Yamba, F. (2022) 'Cross-sectoral perspectives.' In: IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.005.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter12.pdf
11. Bolivian Forestry Law No. 1700 (1996)
<https://policycommons.net/artifacts/4816266/ley-forestal-no-1700-ley-de-12-de-julio-de-1996/5652909/>.
12. Boston Consulting Group (BCG) and AFEN (2025) Carbon dioxide removal: Reaching the full potential of France. <https://web-assets.bcg.com/5b/5d/2769ece643b38516dd0ecd991bd6/carbondioxide-removal-reaching-the-full-potential-of-france.pdf>
13. Boston Consulting Group (BCG) (2024a) Boosting demand for carbon dioxide removal. <https://www.bcg.com/publications/2024/boosting-demand-for-carbon-dioxide-removal>
14. Boston Consulting Group (BCG) and DVNE (2024b) Carbon dioxide removal: Europe and Germany's role in capturing economic potential. https://cms.think-negative.org/uploads/240620_dvne_bcg_cdr_economic_potential_en_vfinal_180dpi_b4aa840efcaf_1754461b25.pdf
15. Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrasio, R. M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M. G., James, R. H., Pearce, C. R., Mercure, J.-F., Pollitt, H., Holden, P. B., Edwards, N. R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N. F., Janssens, I. A., Hansen, J., & Banwart, S. A. (2020) Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583, 242 -248.
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9>
16. Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., Taylor, L.L., Zhang, S., Kanzaki, Y., Eufrasio, R.M., et al. (2025) 'Transforming US agriculture for carbon removal with enhanced weathering', *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08429-2>
17. Bian, L., Dikau, S., Miller, H., Pierfederici, R., Stern, N., & Ward, B. (2024) China's role in accelerating the global energy transition through green supply chains and trade. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2024/02/Chinas-role-in-accelerating-the-global-energy-transition-through-green-supply-chains-and-trade.pdf>

18. Bisotti, F., Hoff, K.A., Mathisen, A. & Hovland, J. (2024) Direct Air Capture (DAC) deployment: A review of industrial deployment. *Chemical Engineering Science*, 283, 119416. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119416>
19. BMUKN - Bundesministerium für Umwelt (2025) Grünes Buch 2025. https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ministerium/gruenes_buch_2025_bf.pdf
20. Boerst, J., Pena Cabra, I., Sharma, S., Zaremsky, C., & Iyengar, A. K. S. (2024) Strategic siting of direct air capture facilities in the United States. *Energies*, 17(15), 3755. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/15/3755>
21. Bonsch, M., Humpenöder, F., Popp, A., Bodirsky, B., Dietrich, J. P., Rolinski, S., Biewald, A., Lotze-Campen, H., Weindl, I., Gerten, D. and Stevanovic, M. (2014) 'Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production', *GCB Bioenergy*, 8(1), pp. 11 -24. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12226>
22. Canada Revenue Agency (CRA) (n.d.) Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Investment Tax Credit (ITC) <https://www.canada.ca/en/revenue-agency/services/tax/businesses/topics/corporations/business-tax-credits/clean-economy-itc/carbon-capture-itc.html>
23. Carbon Gap (2025a) Carbon Dioxide Removal 101. <https://carbongap.org/carbon-dioxide-removal-101/>
24. Carbon Gap (2025b) CDR Funding in Europe - Trends & Live Database. <https://tracker.carbongap.org/funding/>
25. Carbonfuture (2024) Multi-year agreement with Swiss Re; Exomad Green as key supply partner. <https://www.carbonfuture.earth/magazine/carbonfuture-and-swiss-re-enter-into-landmark-multi-year-agreement-for-carbon-removal-with-exomad-green-as-key-supply-partner>
26. Carnegie Endowment (2025) Unlocking global geothermal energy: Pathways to scaling international deployment of next-generation geothermal. <https://carnegieendowment.org/research/2025/07/unlocking-global-geothermal-energy-pathways-to-scaling-international-deployment-of-next-generation-geothermal?lang=en>
27. CDR.fyi (2025a) A Global View of CDR - Insights from the Carbon Removal Map. <https://www.cdr.fyi/blog/carbon-removal-map-insight>
28. CDR.fyi (2025b) Global carbon removal market tracker. <https://www.cdr.fyi/>

29. CDR.fyi (2025c) 2025 Q2 Durable CDR Market Update - Biggest Quarter Ever. Cdr.fyi.<https://www.cdr.fyi/blog/2025-q2-durable-cdr-market-update-biggest-quarter-ever> [Accessed 2 Nov. 2025].
30. CEIC (2024) Bolivia - Employment in agriculture (% of total, ILO modelled). <https://www.ceicdata.com/en/bolivia/employment-and-unemployment/bo-employment-in-agriculture-modeled-ilo-estimate--of-total-employment>
31. Central Bank of Kenya (2024) Agriculture Sector Survey - January 2024 (landing page) <https://www.centralbank.go.ke/2024/02/09/agriculture-sector-survey-of-january-2024/>
32. Chen, D., Liu, X., Bian, R., Cheng, K., Zhang, X., Zheng, J., Joseph, S., Crowley, D. and Pan, G. (2018) 'Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals - A meta-analysis', *Journal of Environmental Management*, 222, pp. 76 -85. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718305176>
33. Chiaramonti, D., Lehmann, J., Berruti, F., Giudicianni, P., Sanei, H. & Masek, O. (2024) Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. *Biochar*, 6(81). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7>
34. Climate Laws - Bolivia (2024) Decreto Supremo N° 5264, 30 de octubre de 2024: Estableciendo lineamientos para la gestión y acceso al financiamiento climático para la implementación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas. La Paz: Estado Plurinacional de Bolivia. https://climate-laws.org/document/supreme-decree-5264-establishing-the-climate-finance-management-and-access-guidelines-for-implementing-bolivia-s-nationally-determined-contributions_f92e
35. Dados, N. and Connell, R. (2012) 'The Global South', *The Global South*, 11(1), pp. 12 - 23. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1536504212436479>
36. Deng, X., Teng, F., Chen, M., Du, Z., Wang, B., Li, R. & Wang, P. (2024) 'Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China', *Nature Communications*, 15, 1085. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45314-y>
37. Deprez, A., Leadley, P., Dooley, K., Williamson, P. et al. (2024) 'Sustainability limits needed for CO₂ removal', *Science*, 383(6682), pp. 484 -486. https://www.researchgate.net/publication/377894510_Sustainability_limits_needed_for_CO2_removal
38. Deprez, A., Leadley, P., Dooley, K., Williamson, P., Cramer, W., Gattuso, J.-P., Rankovic, A., Carlson, E. L., & Creutzig, F. (2024) Sustainability limits needed for CO₂ removal: The true climate mitigation challenge is revealed by considering sustainability impacts. *Science*, 383(6682), 484 -486. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adj6171>

39. Eberhard, A., Kolker, J. and Leigland, J. (2014) South Africa's Renewable Energy IPP Procurement Program: Success Factors and Lessons. Washington, DC: Public-Private Infrastructure Advisory Facility (PPIAF).
https://www.connect4climate.org/sites/default/files/2024-10/South-Africa-REIPP-Report_final_web.pdf
40. Edwards, D. P., Lim, F., James, R. H., Pearce, C. R., Scholes, J., Freckleton, R. P., & Beerling, D. J. (2017) Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biology Letters*, 13(4), 20160715.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5414686/>
41. EEA (2023) Gross value added of the environmental goods and services sector. [www.eea.europa.eu. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/gross-value-added-of-the](https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/gross-value-added-of-the).
42. Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2024) Marchi, G., dos Reis, J. C., da Silva Neto, S. P. and Pereira, C. D. Aspectos econômicos da produção de soja com o uso de remineralizadores e bioinsumos no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Ministério da Agricultura e Pecuária. (Documentos, 410).
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1164268/1/Aspectos-economicos-producao-soja-2024.pdf>
43. Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária(2022) Relatório de avaliação dos impactos de soluções tecnológicas geradas pela Embrapa: Remineralizadores para o cultivo de grãos. Fernandes, P. C. C., Martins, E. de S., Marchi, G. and De Sousa, T. C. R. Brasília: Embrapa Cerrados.
https://bs.sede.embrapa.br/2022/relatorios/cerrados_remineralizadoresdegraos.pdf
44. EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2025) Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025: Ano-base 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Published 29 May.
<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico-nacional-2025>
45. ENS DK - Danish Energy Agency (2025) CCS tenders and other funding for CCS development. Copenhagen: Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities.
<https://ens.dk/en/supply-and-consumption/ccs-tenders-and-other-funding-ccs-development>
46. ESA (2019) Biomass: Quantifying carbon in forests. Esa.int.
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/12/Biomass_Quantifying_carbon_in_forests

47. ESABCC (2025) Scaling up carbon dioxide removals Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU. European Scientific Advisory Board on Climate Change. doi:<https://doi.org/10.2800/3253650>.
48. European Commission (2024a) COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT REPORT Part 1 Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. https://climate.ec.europa.eu/document/download/768bc81f-5f48-48e3-b4d4-e02ba09faca1_en.
49. European Commission. (2023) Environmental economy – statistics on employment and growth – Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Environmental_economy_%E2%80%93_statistics_on_employment_and_growth.
50. European Commission (2024b) Commission approves €3 billion Swedish State aid scheme to support the roll-out of biogenic carbon dioxide capture and storage. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_3583
51. European Commission (2025a) Carbon removals and carbon farming. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en
52. European Commission, Directorate-General for Climate Action (2025b) New EU studies explore purchasing programme to boost permanent carbon removals in Europe. https://climate.ec.europa.eu/news-other-reads/news/new-eu-studies-explore-purchasing-programme-boost-permanent-carbon-removals-europe-2025-08-27_en
53. European Commission (2025c) Consultation: EU Emissions Trading System and Market Stability Reserve (15 Apr 2025). https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/commission-launches-public-consultation-eu-emissions-trading-system-and-market-stability-reserve-2025-04-15_en
54. European Commission (2025d) Environmental economy – statistics on employment and growth.. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Environmental_economy_%E2%80%93_statistics_on_employment_and_growth
55. European Commission (2025e) Questions and answers on the 2040 EU climate target proposal. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_25_1688
56. Eurostat (2024) 'Employment and value added using FIGARO data - view into the automotive industry', Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Employment_and_value_added_using_FIGARO_data_-_view_into_the_automotive_industry

[explained/index.php?title=Employment and value added using FIGARO data - view into the automotive industry](#)

57. Exomad Green (2025) Bolivia: A groundbreaking documentary on carbon removal. Press release, 11 June. <https://www.exomadgreen.com/post/new-documentary-shines-light-on-exomad-green-s-biochar-based-carbon-removal-in-bolivia>
58. Fairhead, J., Leach, M. and Scoones, I. (2012) 'Green grabbing: a new appropriation of nature?', *The Journal of Peasant Studies*, 39(2), pp. 237 -261. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03066150.2012.671770>
59. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2012) World Agriculture Towards 2050 - Revision summary. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/esag/docs/AT2050_revision_summary.pdf
60. Fendrich, A., Feng, Y., Wigneron, J.-P., Chave, J., Araza, A., Li, Z., Herold, M., Ometto, J., Aragão, L. E. O. C., Cano, I. M., Zhu, L., Xu, Y., & Ciais, P. (2025) 'Human influence on Amazon's aboveground carbon dynamics intensified over the last decade', *Nature Communications*, 16, 6681. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12280014/>
61. Flores, B.M., Montoya, E., Sakschewski, B., Nascimento, N., Staal, A., Betts, R.A., Levis, C., Lapola, D.M., Esquivel-Muelbert, A., Jakovac, C., Nobre, C.A., Oliveira, R.S., Borma, L.S., Nian, D., Boers, N., Hecht, S.B., ter Steege, H., Arieira, J., Lucas, I.L., Berenguer, E., Marengo, J.A., Gatti, L.V., Mattos, C.R.C. and Hirota, M. (2024) 'Critical transitions in the Amazon forest system', *Nature*, 626, pp. 555 -564. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0>
62. Freer, M., Gough, C., Welfle, A. and Lea-Langton, A. (2022) 'Putting Bioenergy with Carbon Capture and Storage in a Spatial Context: What Should Go Where?', *Frontiers in Climate*, 4, 826982. <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.826982/full>
63. Fu, X. and Shi, L. (2022) Direction of innovation in developing countries and its driving forces. WIPO Economic Research Working Paper Series, No. 69. Geneva: World Intellectual Property Organization (WIPO). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4422271
64. Fu, X. (2024) 'AI and digital technologies inappropriate to developing countries: What to do', Project Syndicate, March. <https://www.project-syndicate.org/onpoint/ai-digital-technologies-inappropriate-to-developing-countries-what-to-do-by-xiaolan-fu-2024-03>
65. Fuhrman, J., Clarens, A. F., McJeon, H., Patel, P., Doney, S. C., Shobe, W. M., & Pradhan, S. (2021) The role of negative emissions in meeting China's 2060 carbon neutrality goal. https://www.researchgate.net/publication/351880381_The_role_of_negative_emissions_in_meeting_China's_2060_carbon_neutrality_goal

66. Gabriel, L.F., Ribeiro, L.C. de S., Jayme Júnior, F.G. and Oreiro, J.L. (2020) 'Manufacturing, economic growth, and real exchange rate: Empirical evidence in panel data and input -output multipliers', *PSL Quarterly Review*, 73(292), pp. 51 -75. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/324024/1/1733826955.pdf>
67. Ganeshan, P., Vigneswaran, V.S., Gowd, S.C., Mishra, R., Singh, E., Kumar, A., Kumar, S., Pugazhendhi, A. & Rajendran, K. (2023) Bioenergy with carbon capture, storage and utilization: Potential technologies to mitigate climate change. *Biomass and Bioenergy*, 177, 106941. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106941>
68. GGGI - Grafakos, S., Senshaw, D., Quezada, D., and Toro A., (2020), Employment Assessment of Renewable. Global Growth Insititute. https://gggi.org/wp-content/uploads/2020/06/Employment-Assessment-of-Renewable-Energy_Web_final.pdf
69. Gidden, M.J., Joshi, S., Armitage, J.J., Christ, A.-B., Boettcher, M., Brutschin, E., et al. (2025) 'A prudent planetary limit for geologic carbon storage', *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09423-y>
70. Goldemberg, J., Coelho, S.T., Nastari, P.M. and Lucon, O. (2006) 'The ethanol program in Brazil: a review', *Energy Policy*, 32(7), 799-807. (Document link provided via ResearchGate download.) https://www.researchgate.net/publication/230974948_The_ethanol_program_in_Brazil/link/546e04ef0cf2bc99c2150e4a/download
71. GOV.UK - Department for Energy Security and Net Zero (2025) Integrating greenhouse gas removals in the UK Emissions Trading Scheme: consultation outcome. <https://www.gov.uk/government/consultations/integrating-greenhouse-gas-removals-in-the-uk-emissions-trading-scheme>
72. Günther, P. and Ekardt, F. (2022) 'Human rights and large-scale carbon dioxide removal: Potential limits to BECCS and DACCS deployment', *Land*, 11(12), 2153. <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/12/2153>
73. Harrison, B. P., Gao, S., Gonzales, M., Thao, T., Bischak, E., Ghezzehei, T. A., Berhe, A. A., Diaz, G., & Ryals, R. A. (2022) Dairy manure co-composting with wood biochar plays a critical role in meeting global methane goals. *Environmental Science & Technology*, 56(14), 10220 -10230. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c03467>
74. Hasegawa, T., Fujimori, S., Havlík, P., Valin, H., Bodirsky, B. L., Doelman, J. C., Fellmann, T., Kyle, P., Koopman, J. F. L., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., Ochi, Y., Pérez Domínguez, I., Stehfest, E., Sulser, T. B., Tabeau, A., Takahashi, K., Takakura, J., van Meijl, H. and van Zeist, W. J. (2018) 'Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy', *Nature Climate Change*, 8(8), pp. 699 -703.

<https://research.wur.nl/en/publications/risk-of-increased-food-insecurity-under-stringent-global-climate->

75. Huang, X., Chang, S., Zheng, D., & Zhang, X. (2020) The role of BECCS in deep decarbonization of China's economy: A computable general equilibrium analysis. *Energy Economics*, 92, 104968. https://www.researchgate.net/publication/347698823_The_role_of_BECCS_in_deep_decarbonization_of_China%27s_economy_A_computable_general_equilibrium_analysis
76. IEA PVPS - Masson, G., de l'Epine, M., Kaizuka, I., Bosch, E., Macé, P., Van Rechem, A., Plaza, C., Barguès, A., Lindahl, J., & Oller Westerberg, A. (2024) Trends in Photovoltaic Applications 2024. IEA PVPS Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach, Report IEA PVPS T1-43:2024. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS). <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf#:~:text=When%20specifically%20focusing%20on%20development,distributed%20systems%20in%20developing%20countries>
77. IGSD - Institute for Governance & Sustainable Development (2024) Enhanced rock weathering in the Global South: Exploring potential for enhanced agricultural productivity and CO₂ drawdown. <https://www.igsd.org/publications/enhanced-rock-weathering-in-the-global-south-exploring-potential-for-enhanced-agricultural-productivity-and-carbon-dioxide-drawdown/>
78. IMF (2023) World Economic Outlook Database - Groups and Aggregates. International Monetary Fund. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2023/April/groups-and-aggregates>
79. Harp, T. and Prasad, K. Industry. Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2024/08/CAR-LV-Mfg-Econ-Contribution-Analysis-MBS-2024.pdf>
80. IEA - International Energy Agency (2022) Africa Energy Outlook 2022 - Key findings. <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2022/key-findings>
81. IEA - International Energy Agency (2024a) Carbon capture, utilisation and storage - Energy system. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
82. IEA - International Energy Agency (IEA) (2024b) Direct Air Capture. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>

83. International Energy Agency (2024c) Kenya 2024 - Executive summary.
<https://www.iea.org/reports/kenya-2024/executive-summary>
84. IEA - International Energy Agency (2024d) Kenya - Electricity.
<https://www.iea.org/countries/kenya/electricity>
85. IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.005.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter12.pdf
86. IPCC (2019) Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>
87. IPCC (2018) Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
<https://www.ipcc.ch/sr15/>
88. ITA - Trade.gov - U.S. Department of Commerce (2024a) Bolivia - Market overview.
<https://www.trade.gov/country-commercial-guides/bolivia-market-overview>
89. ITA - Trade.gov - U.S. Department of Commerce (2024b) Kenya - Energy and electrical power systems. <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/kenya-energy-electrical-power-systems>
90. Jiang, Y., Li, T., Xu, X., Sun, J., Pan, G., & Cheng, K. (2024) A global assessment of the long-term effects of biochar application on crop yield. Current Research in Sustainability Science, 6, 100247.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666049024000070#:~:text=Across%20all%20types%20of%20crops,increase%20even%20after%206%20years.>
91. Jones, C.I. (2011) Input -output multipliers, general purpose technologies, and economic development. Stanford University.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Input-Output-Multipliers-%2C-General-Purpose-%2C-and-Jones/266d16efe9fe33646993f96388ddfb4b4126665>
92. KEFM - Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities (2022) Klimaprogram 2022. Copenhagen: Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet.
https://www.kefm.dk/Media/638013322993950605/1042399_klimaprogram-a.pdf

93. KNBS - Kenya National Bureau of Statistics (2025) Economic Survey 2025 - Popular Version. <https://www.knbs.or.ke/wp-content/uploads/2025/05/2025-Economic-Survey-Popular-Version.pdf>
94. Kraxner, F., Fuss, S., Leduc, S., Yowargana, P., Kindermann, G., Pietsch, S., & Hetland, J. (2015) Driving clean energy and green economy with the help of forest-based bioenergy with CCS (BECCS): A case study on Indonesia. In Proceedings of the XIV World Forestry Congress, Durban, South Africa, 7 -11 September 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) <https://foris.fao.org/wfc2015/api/file/5547ee1615ae74130aee6aca/contents/aaffd844-ebc7-4088-811b-aa627b40fdbb.pdf>
95. Lap, T., Benders, R., van der Hilst, F. and Faaij, A. (2023) 'BECCS as climate mitigation option in a Brazilian low carbon energy system: Estimating potential and effect of gigatonne scale CO₂ storage', International Journal of Greenhouse Gas Control, 128, 103945. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583623001159>
96. Lebdioui, A. (2024) Survival of the Greenest: Economic Transformation in a Climate-conscious World. Elements in Development Economics series. Cambridge: Cambridge University Press.
97. Lefebvre, D., Fawzy, S., Aquije, C. A., Osman, A. I., Draper, K. T., & Trabold, T. A. (2023) Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. Biochar, 5, 65. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42773-023-00258-2.pdf>
98. Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J.E., Cayuela, M.L., Camps-Arbestain, M. and Whitman, T. (2021) Biochar in climate change mitigation. Nature Geoscience, 14(12), pp.883-892. doi:<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>.
99. Lema, R., Fu, X. and Rabellotti, R. (2020) 'Green windows of opportunity: Latecomer development in the age of transformation toward sustainability', Industrial and Corporate Change, 29(5), pp. 1193 -1209. <https://academic.oup.com/icc/article/29/5/1193/6137243>
100. Li, S., Carlsen, W., Harasaki, H., & Ribeiro, C. (2024) How US States Can Lead on Carbon Removal Policy. World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/technical-perspectives/us-state-carbon-dioxide-removal-policies>
101. Li, X., Wu, D., Liu, X., Huang, Y., Cai, A., Xu, H., Ran, J., Xiao, J. and Zhang, W. (2024) 'A global dataset of biochar application effects on crop yield, soil properties and greenhouse gas emissions', Scientific Data, 11:57 [Data Descriptor]. <https://www.nature.com/articles/s41597-023-02867-9>

102. Liu, Y., Miao, Y., Wang, L., Gu, X., Li, Z., Fujikawa, S., & Yu, L. (2025) Addressing solar power curtailment by integrating flexible direct air capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 14, 100304. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772656824001167>.
103. Lowder, S.K., Sánchez, M.V. and Bertini, R. (2021) 'Which farms feed the world and has farmland become more concentrated?', *World Development*, 142, 105455. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X2100067X?via%3Dihub>
104. McKinsey & Company (2023) Carbon removals: How to scale a new gigaton industry. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/carbon-removals-how-to-scale-a-new-gigaton-industry>
105. Mercom India (2020) India records lowest solar tariff. <https://www.mercomindia.com/india-record-lowest-solar-tariff>
106. MIGA - Multilateral Investment Guarantee Agency, World Bank Group (2024) MIGA guarantee to strengthen food security in Kenya (press release). <https://www.miga.org/press-release/miga-guarantee-strengthen-food-security-kenya>
107. Mills, M. B., Malhi, Y., Ewers, R. M., Riutta, T. et al. (2023) 'Tropical forests post-logging are a persistent net carbon source to the atmosphere', *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 120(3), e2214462120. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2214462120>
108. MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária (2017) Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016: Estabelece normas sobre o uso de remineralizadores e substratos para plantas. Brasília: Governo Federal do Brasil. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf/view>
109. MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária (2022) Plano Nacional de Fertilizantes. Brasília: Governo Federal do Brasil. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes>
110. Mazzucato, M., Doyle, S. and Kuehn von Burgsdorff, L. (2024) Mission-oriented industrial strategy: Global insights. IIPP Policy Report No. 2024/09. London: UCL Institute for Innovation and Public Purpose. ISBN 978-1-917384-01-8. <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/sites/bartlett/files/mission-oriented-industrial-strategy-global-insights-2024.pdf>
111. Mintz-Woo, K., & Lane, J. (2021) Why and where to fund carbon capture and storage. *Science and Engineering Ethics*, 27(6), 70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11948-021-00344-3>

112. Morato, T., Vaezi, M., & Kumar, A. (2019) Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 14-23. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118307846>
113. Moreira, J. R., Romeiro, V., Fuß, S., Kraxner, F., & Pacca, S. A. (2016) BECCS potential in Brazil: Achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues. *Applied Energy*, 179, 55 -63. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13339/>
114. Nawaz, S., McLaren, D., Caggiano, H., Hudson, A. D. and Scott-Buechler, C. (2025) 'Carbon removal for a just transition', *Climate Policy*, 25(6), pp. 926 -937. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2024.2418305>
115. OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2024) *Africa's Development Dynamics* 2024. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/07/africa-s-development-dynamics-2024_80022d4b/df06c7a4-en.pdf
116. Oh, S., Greene, J., Honegger, M. and Michaelowa, A. (2025) 'Review of economics and policies of carbon dioxide removal', *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 12:6 [Review]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40518-025-00252-1>
117. Oliver Wyman (2024) *Unlocking the Potential of Carbon Dioxide Removal: Carbon Dioxide Removal Solutions*. <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2024/jun/carbon-dioxide-removal-solutions.html>
118. Oppon, E., Koh, S. C. L., & Eufrazio, R. (2024) Sustainability performance of enhanced weathering across countries: A triple bottom line approach. *Energy Economics*, 136, 107722. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988324004304?via%3Dihub>
119. Patel, M. R., & Panwar, N. L. (2023) Biochar from agricultural crop residues: Environmental, production, and life cycle assessment overview. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200173. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667378923000457>
120. PUCRS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2024) PUCRS inaugura primeiro equipamento que realiza captura direta de CO₂ na América Latina. Porto Alegre: PUCRS, 29 November. <https://portal.pucrs.br/noticias/impacto-social/pucrs-inaugura-primeiro-equipamento-que-realiza-captura-direta-de-co2-na-america-latina/>

121. Qiu, Y., Iyer, G., Fuhrman, J., Hejazi, M., Kamboj, P. and Kyle, P. (2024) 'The role and deployment timing of direct air capture in Saudi Arabia's net-zero transition', *Environmental Research Letters*, 19(6), 064042. https://www.researchgate.net/publication/380562530_The_role_and_deployment_timing_of_direct_air_capture_in_Saudi_Arabia%27s_net-zero_transition
122. Qiu, Y., Lamers, P., Daioglou, V., McQueen, N., de Boer, H.-S., Harmsen, M., Wilcox, J., Bardow, A. and Suh, S. (2022) 'Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100', *Nature Communications*, 13, 3635. doi:10.1038/s41467-022-31345-4. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31146-1>
123. Ram, M., Aghahosseini, A. and Breyer, C. (2019) 'Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050', *Technological Forecasting and Social Change*, 151, p. 119682. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162518314112>
124. Ranevska, S. (2025) Coalition Of Global South Suppliers Calls For International CDR Recognition In EU Climate Law. <https://carbonherald.com/coalition-of-global-south-suppliers-calls-for-international-cdr-recognition-in-eu-climate-law/>
125. Rhodium Group - Bower, G., Pastorek, N. and Larsen, J. (2025a) The benefits of innovation: An assessment of the economic opportunities of highly durable carbon dioxide removal. Washington, DC: Rhodium Group, Energy & Climate Report, 14 January. <https://rhg.com/research/the-benefits-of-innovation-an-assessment-of-the-economic-opportunities-of-highly-durable-carbon-dioxide-removal/>
126. Rhodium Group - Dasari, N., O'Rear, E. and Larsen, J. (2025b) Intellectual property rights and global direct air capture scale-up. Washington, DC: Rhodium Group, 23 July. <https://rhg.com/wp-content/uploads/2025/07/IP-Rights-and-Global-Direct-Air-Capture-Scale-Up.pdf>
127. Romm, J., Lezak, S. and Amna Alshamsi (2025) Are Carbon Offsets Fixable? *Annual Review of Environment and Resources*, 50(1), pp.649-680. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112823-064813>.
128. Rutovitz, J., Dominish, E., & Downes, J. (2015) Calculating Global Energy Sector Jobs: 2015 Methodology Update. <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/43718/1/Rutovitzetal2015Calculatingglobalenergysectorjobsmethodology.pdf>
129. Ryngaert, C. and Taylor, M. (2020). The GDPR as Global Data Protection Regulation? *AJIL Unbound*, 114(1), pp.5-9. doi:<https://doi.org/10.1017/aju.2019.80>.

130. Sánchez, J. P. (2025) 'Bolivia opened its carbon market: From prohibition to green financing opportunity', Marcasur International, <https://marcasur.com/en/noticia/bolivia-opened-its-carbon-market-from-prohibition-to-green-financing-opportunity&f=-2025>
131. Sanei, H., Rudra, A., Przyswitt, Z.M.M., Kousted, S., Sindlev, M.B., Zheng, X., Nielsen, S.B. and Petersen, H.I. (2024) Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281, p.104409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>.
132. S&P - Global Commodity Insights. (2025a) Switzerland, Norway ink world's first Article 6.2 durable carbon removal deal. <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/061825-switzerland-norway-ink-worlds-first-article-62-durable-carbon-removal-deal>.
133. S&P - Global Commodity Insights (2025b) Microsoft-Exomad Green ink 1.24 Mt biochar CDR pact. <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/energy-transition/052125-microsoft-exomad-green-ink-124-million-mt-biochar-carbon-removals-pact>
134. Schenuit, F., Gidden, M.J., Boettcher, M., Brutschin, E., Fyson, C., Gasser, T., Geden, O., Lamb, W.F., Mace, M.J., Minx, J.C., Riahi, K., et al. (2023) 'Secure robust carbon dioxide removal policy through credible certification', *Communications Earth & Environment*, 4:349 [Comment]. <https://www.nature.com/articles/s43247-023-01014-x>
135. SENAI CIMATEC (2023) SENAI CIMATEC e Repsol Sinopec lançam Projeto DAC 5000 para remoção de até 5 mil toneladas de CO₂ do ar por ano. Salvador: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) Bahia, 12 June. <https://www.senaicimatec.com.br/noticias/senai-cimatec-e-repsol-sinopec-lancam-projeto-dac-5000-para-remocao-de-ate-5-mil-toneladas-de-co2-do-ar-por-ano/>
136. Shahbaz, M., AlNouss, A., Ghiat, I., McKay, G., Mackey, H., Elkhailifa, S. and Al-Ansari, T. (2021) 'A comprehensive review of biomass-based thermochemical conversion technologies integrated with CO₂ capture and utilisation within BECCS networks', *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105734. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921003438>
137. Sileshi, G.W., Barrios, E., Lehmann, J. and Tubiello, F.N. (2025) 'An Organic Matter Database (OMD): Consolidating global residue data from agriculture, fisheries, forestry and related industries', *Earth System Science Data (ESSD)*, 17, 369-391. <https://essd.copernicus.org/articles/17/369/2025/essd-17-369-2025.pdf>
138. Skeer, J. (2016) Global Potential for Sustainable Biomass & Rural Development. Presentation at the Nordic Baltic Bioenergy Conference, Vilnius, 20 April 2016.

International Renewable Energy Agency (IRENA). https://lsta.lt/files/events/2061-04-19_LITBIOMA/37_Jeffrey%20Skeer.pdf

139. Skov, K., Wardman, J., Healey, M., McBride, A., Bierowiec, T., Cooper, J., Edeh, I., George, D., Kelland, M. E., Mann, J., Manning, D., Murphy, M. J., Pape, R., Liu, X., et al. (2024) Initial agronomic benefits of enhanced weathering using basalt: A study of spring oat in a temperate climate. *PLOS ONE*, 19(3), e0295031. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0295031>
140. Sovacool, B. K. (2023) 'Expanding carbon removal to the Global South: Thematic concerns on systems, justice, and climate governance', *Energy and Climate Change*, 4, 100103. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666278723000107>
141. SOVCM - Ecosystem Marketplace (2025) State of the Voluntary Carbon Market (SOVCM): Meeting the Moment - Renewing Trust in Carbon Finance. Washington, DC: Forest Trends Association. <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/2025-state-of-the-voluntary-carbon-market-sovcm/>
142. State of Carbon Dioxide Removal - Smith, S.M., Geden, O., Gidden, M.J., Lamb, W.F., Nemet, G.F., Minx, J.C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M.R., Fuss, S., Johnstone, I., Müller-Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B.S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I. and Vaughan, N.E. (eds.) (2024) The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition. DOI: 10.17605/OSF.IO/F85QJ. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>
143. Stenzel, F., Greve, P., Lucht, W., Tramberend, S., Wada, Y. and Gerten, D. (2021) 'Irrigation of biomass plantations may globally increase water stress more than climate change', *Nature Communications*, 12(1), 1512. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33686076/>
144. Streck, C., Minoli, S., Roe, S., Barry, C., Brander, M., Chiquier, S., Cullity, G., Ellis, P., Funk, J., Gidden, M.J., Honegger, M., Tamme, E., Zarin, D., et al. (2025) 'Considering durability in carbon dioxide removal strategies for climate change mitigation', *Climate Policy* [Perspective]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2025.2501267>
145. Suwannakarn, N., & Abdul Salam, P. (2024) Assessment of land-based negative emissions options in Thailand. *Carbon Management*, 15(1), 2372318. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17583004.2024.2372318>
146. The Guardian. (2023) Revealed: More than 90% of Rainforest Carbon Offsets by Biggest Provider Are worthless, Analysis Shows. <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>.

147. The Guardian. (2024) BP-owned company is selling carbon credits on trees that aren't in danger, analysis finds. <https://www.theguardian.com/environment/article/2024/jul/11/finite-carbon-forest-offsets-analysis>.
148. U.S. Department of Commerce (2024) Bolivia - Market overview. (duplicate site, retained per original list.) <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/bolivia-market-overview>
149. US treasury (2024) Voluntary Carbon Markets Joint Policy Statement and Principles. <https://home.treasury.gov/system/files/136/VCM-Joint-Policy-Statement-and-Principles.pdf>.
150. UNIDO - Mazzucato, M. and Kattel, R. (2023) Mission-oriented industrial strategy. Policy Brief Series: Insights on Industrial Development, Issue No. 2, March 2023. University College London (UCL) Institute for Innovation and Public Purpose (IIPP). <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2023-04/IID%20Policy%20Brief%202%20-%20Mission-oriented%20industrial%20strategy%20-%20Final.pdf>
151. UNIDO - Lavopa, A. & Riccio, F. (2025) The multiplier effect of industrial jobs (Policy Brief No. 18). Vienna: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2025-03/IID%20Policy%20Brief%2018%20-%20Multiplier%20effect%20of%20industrial%20jobs.pdf>
152. United Nations (2024) World Population Prospects (WPP). <https://population.un.org/wpp>
153. UNDP - United Nations Development Programme (2024) Africa launch of the 2023/2024 Human Development Report. <https://www.undp.org/africa/events/africa-launch-2023-2024-human-development-report>
154. USDA (2023) Benefits of the U.S. Inflation Reduction Act (IRA) For Solar PV Manufacturing, System Performance, Reliability and LCOE. Nrel.gov. <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/85330.pdf>.
155. USDA - Amonette, J.E., Lehmann, J., Joseph, S., Woolf, D. and Street-Perrott, F.A. (2021) Biochar as a carbon capture and storage pathway. USDA Forest Service. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_journals/2021/rmrs_2021_amonette_j002.pdf
156. van Dijk, M., Morley, T., Rau, M.L. and Saghai, Y. (2021) 'A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050', Nature Food, 2, 494-501 [Systematic review & meta-analysis]. <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00322-9>

157. Vienne, A., Poblador, S., Portillo-Estrada, M., Hartmann, J., Ijehon, S., Wade, P. and Vicca, S. (2022) 'Enhanced weathering using basalt rock powder: Carbon sequestration, co-benefits and risks in a mesocosm study with *Solanum tuberosum*', *Frontiers in Climate*, 4, 869456. <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.869456/full>
158. Wang, Y., Zhu, Y., Cook-Patton, S. C., Sun, W., Zhang, W., Ciais, P., Li, T., Smith, P., Yuan, W., Qin, Z. et al. (2025) 'Land availability and policy commitments limit global climate mitigation from forestation', *Science*, 389(6763), pp. 931 -934. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adj6841>
159. Wei, B., Peng, Y., Lin, L., Zhang, D., Ma, L., Jiang, L., Li, Y., He, T., & Wang, Z. (2023) Drivers of biochar-mediated improvement of soil water retention capacity based on soil texture: A meta-analysis. *Geoderma*, 437, 116591. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706123002689>
160. Wen, D., Gao, W., & Ren, J. (2021) Development of solar photovoltaic industry and market in China, Germany, Japan and the United States of America using incentive policies. *Energy Exploration & Exploitation*, 39(5), 1419 -1457. First published online: 13 December 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598720979256>
161. Whitehead, A. (2025) Independent Review of Greenhouse Gas Removals. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/68f8d27a0794bb80118bb764/independent-review-of-ggr.pdf>
162. Woolf, D., Lehmann, J. and Lee, D.R. (2016) 'Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration', *Nature Communications*, 7:13160. <https://www.nature.com/articles/ncomms13160>
163. Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S. M., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B. & Baldock, J. (2021) 'Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil', *Environmental Science & Technology*, 55(21), pp. 14795 -14805. <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/8/7329/files/2021/11/EST-55-14795-14805-2021-Woolf.pdf>
164. World Bank - PPP (2017) Chile solar auction sets new record-low solar PV tariff. <https://ppp.worldbank.org/library/chile-solar-auction-sets-new-record-low-solar-pv>
165. World Bank (2024) The demographic profile of the global poor - who are the poor and where do they live? <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/the-demographic-profile-of-the-global-poor--who-are-the-poor-and>
166. World Bank (2025a) World Bank country and lending groups. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>

167. World Bank (2025b) Employment in agriculture (% of total employment) - Kenya. <https://data.worldbank.org/indicator/SL.AGR.EMPL.ZS?locations=KE>
168. WHO - World Health Organization (2024) Ambient air pollution. Global Health Observatory (GHO) Data. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/indicator-groups/indicator-group-details/GHO/ambient-air-pollution>
169. XPRIZE Foundation (2025) XPRIZE Carbon Removal. <https://www.xprize.org/prizes/carbonremoval>
170. Xu, Y., Smith, P., & Qin, Z. (2024) Sustainable bioenergy contributes to cost-effective climate change mitigation in China. *iScience*, 27(7), 110232.